INVESTIGACION y CIENCIA

EL COMPLEJO DE CABO ORTEGAL

AVIONES INTELIGENTES

REVOLUCION NEOLITICA Y ORIGEN DE LAS LENGUAS



NACIMIENTO DE UNA ESTRELLA

SEPTIEMBRE 1991
600 PTAS.



Septiembre de 1991 Número 180

6 

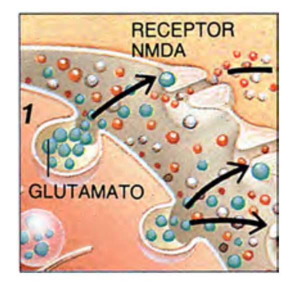
El complejo del Cabo Ortegal
José I. Gil Ibarguchi y Jacques Girardeau

Los complejos españoles de Cabo Ortegal, Ordenes y Malpica-Tuy se consideraron antaño unidades total o parcialmente enraizadas y pertenecientes a un zócalo antiguo. Hoy se sabe, sin embargo, que constituyen restos de unidades estructurales de origen foráneo emplazadas sobre corteza autóctona del continente Gondwana.

16 

Los orígenes de las estrellas
Steven W. Stahler

El Sol atravesó una juventud turbulenta antes de convertirse, llegada su madurez, en fuente estable de energía de fusión. Poco a poco van los astrónomos desenmarañando la complicada madeja del ciclo vital de las estrellas, proceso que empieza con la condensación de nubes en protoestrellas, discernibles sólo en el segmento infrarrojo del espectro.

26 

Tratamiento del accidente cerebrovascular
Justin A. Zivin y Dennis W. Choi

Los médicos se han venido sintiendo impotentes para atender a los enfermos con accidente cerebrovascular. La esperanza reside ahora en las posibilidades que abre el descubrimiento de los mecanismos destructores de las neuronas, que enseñan cómo aliviar la lesión cerebral. Los fármacos que disuelven los coágulos están pasando satisfactoriamente los ensayos.

44 

Interferometría óptica de superficies
Glen M. Robinson, David M. Perry y Richard W. Peterson

La calidad de muchos productos, desde las películas fotográficas y discos de ordenador hasta los rodamientos a bolas, depende de la estructura microscópica de su superficie. Las nuevas técnicas, que se apoyan en el análisis de las figuras de interferencia óptica, sacan a la luz irregularidades del tamaño de un átomo de hidrógeno.

52 

Control biológico de malas hierbas
Gary A. Strobel

No sabemos cuándo una planta no deseada recibió su primera maldición y fue llamada "mala hierba", aunque, por supuesto, mucho antes de que la condenara el *Génesis*. Plantas arrancadas, quemadas y envenenadas por doquier, han resistido en su lucha con el hombre. Este ha cambiado la táctica y se apresta a conocer cómo las atacan sus enemigos naturales.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

60 

Metalurgia de aleaciones de cobre en el Perú antiguo
Izumi Shimada y John F. Merkel

Los españoles extrajeron toneladas de oro y plata del Perú. Pero ignoraron su tradición metalúrgica. A lo largo de seis siglos, bajo distinto poder político, las aleaciones de cobre habían constituido el soporte principal de la tecnología y comercio peruanos.

68 

La dispersión austronesia y el origen de las lenguas
Peter Bellwood

La palabra nació con la revolución neolítica. Parece, en efecto, que fue alumbrada por agricultores que buscaban nuevas tierras que cultivar. Recorriendo costas e islas, las sociedades polinesias extendieron sus lenguas desde Taiwan hasta Madagascar y Hawai.

76 

TENDENCIAS EN TRANSPORTES

¿Te llevo?
Gary Stix

Los modernos aviones "inteligentes" vuelan, casi, solos. Los sistemas de navegación y controles informatizados comienzan a primar sobre la pericia y dones personales del piloto. Se gana en seguridad, afirman las compañías, pero el hombre se siente incómodo y maniatado en tales "cabinas de vidrio".

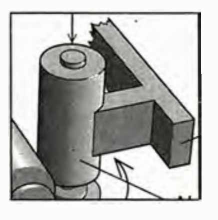
SECCIONES

4 **Hace...**

35 
Ciencia y sociedad

Pequeñas perturbaciones.

40 **Ciencia y empresa**

86 
Juegos matemáticos

Los insectoides invaden un campo de robots.

90 **Libros**

96 **Apuntes**

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *Los orígenes de las estrellas*; Ana Mª García: *Tratamiento del accidente cerebrovascular*; Amando García: *Interferometría óptica de superficies*; Joandomènec Ros: *Control biológico de malas hierbas*; Jordi Puiggené: *Metalurgia de aleaciones de cobre en el Perú antiguo*; Juan José Acero: *La dispersión austronesia y el origen de las lenguas*; J. Vilardell: *¿Te llevo?* y *Hace...*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*.

Ciencia y sociedad:

Joandomènec Ros, J. Enric Llebot y J. M. García de la Mora

Ciencia y empresa:

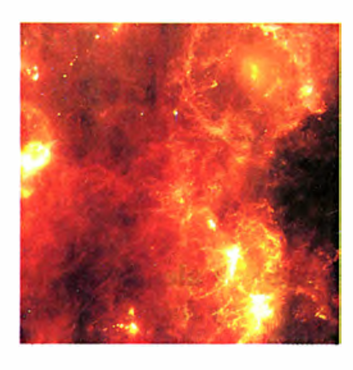
Manuel Puigcerver

Libros:

Pere J. Quetglas, Juan Gallardo, August Palanques y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7	José I. Gil Ibarguchi, Jacques Girardeau y Magda Mària
8	José I. Gil Ibarguchi y Jacques Girardeau
10-12	José I. Gil Ibarguchi, Jacques Girardeau y Magda Mària
13-14	José I. Gil Ibarguchi y Jacques Girardeau
17	Instituto de Tecnología de California (*arriba*), Observatorio de Astronomía Optica (*abajo*)
18-23	George Retseck
27	William J. Powers, Hospital Judío, St. Louis
28	Carol Donner
29	Justin A. Zivin (*arriba*), Tomo Narashima (*abajo*)
30	Tomo Narashima
32	Gary K. Steinberg, Universidad de Stanford
33	Archivo Bettmann
44-45	Glen M. Robinson, David M. Perry y Richard W. Peterson
46-47	Andrew Christie
48-49	G. M. Robinson, D. M. Perry y R. W. Peterson
52	Wilford Hess, Universidad Brigham Young
53	Gary A. Strobel
54	Patricia J. Wynne
55	Photo Researchers, Inc., Patricia J. Wynne, con Jerome Rozen, Jr., Museo Americano de Historia Natural (*recuadro*)
56	Laurie Grace; Patricia J. Wynne (*recuadros*)
57	Claude D. Boyette (*izquierda*), Gary A. Strobel (*derecha*)
58	Laurie Grace; Patricia J. Wynne (*recuadros*)
60-61	Patricia J. Wynne
62	Joe LeMonnier
63	Izumi Shimada (*izquierda*), Patricia J. Wynne (*derecha*)
64-66	Izumi Shimada
69	Michael A. Tongg
76-77	© 1991 de John McGrail
78-79	Gabor Kiss (*recuadros*)
80-81	Boeing Company
82	Lockheed Corp.
83	Laboratorio Armstrong, Base de las Fuerzas Aéreas en Wright-Patterson
84	Flight Dynamics, Inc.
86	Bruce Frisch
87	Michael Goodman
88	Michael Goodman (*arriba*), Bruce Frisch (*abajo*)



LA FOTOGRAFIA de la portada es una imagen infrarroja en falso color que muestra varias nebulosas de la constelación de Orión. En zonas de ese tenor, las masas de gas y de polvo se colapsan formando estrellas (véase "Los orígenes de las estrellas", por Steven W. Stahler, en este mismo número). La parte inferior derecha muestra la nebulosa de Orión y la mancha brillante a la izquierda del centro es la nebulosa de Rosette. Por todas partes se pueden ver estrellas jóvenes. La fotografía, tomada por el *Satélite Astronómico de Infrarrojos* en 1983, se reprocesó en el Laboratorio de Propulsión a Chorro para realzar la imagen y eliminar los defectos.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6600	12.000
Extranjero	7300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

— Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 652 42 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45 - Fax 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3º, D. 20
Barcelona 08003
Tel. 268 45 05 - Fax 268 16 07

OJD Difusión Publicidad

ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa. Línea Fotomecánica, Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: "La Agencia Associated Press transmitía, el 11 de febrero pasado, cuando en Inglaterra apenas había unos cuantos cazas americanos del último modelo y aún menos en primera línea, un despacho muy interesante en el que se citaban palabras de dos ases de la RAF acerca del comportamiento del Tomahawk, uno de nuestros aviones de caza más recientes. 'Es una máquina precisa y briosa. Yo corría más que el Hurricane y hasta podía envolverlo', declaraba el vencedor de diez minutos de combate simulado. Del vencido se citan estas palabras: 'Me envolviste; jamás pude pensar que vería a otro avión hacerle eso a un Hurricane. Los Tomahawk son más rápidos de lo que esperaba.' Los hombres de la RAF llevan el peso del combate y sobre guerra aérea saben más que nosotros. Al considerar tal entusiasmo respecto a nuestros cazas, no debemos olvidar que esas alabanzas proceden de expertos autorizados."

"Está a punto de comercializarse la vacuna antiepiléptica, que habrá de proteger no sólo a los enfermos, sino también al público de los ataques repentinos en medio del tráfico, en el trabajo y otras situaciones peligrosas. A los epilépticos se les somete a un ataque directo contra el mal mediante una sacudida eléctrica en el cerebro. Esta terapia de electrochoque es la misma que se emplea para la esquizofrenia."

"En la reunión de la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia, Miss Anita Newcomb McGee expuso los métodos y resultados de la Comunidad Oneida, donde entre 1868 y 1879 vivieron sesenta niños nacidos según unos principios pretendidamente científicos y de acuerdo con un curioso sistema, ideado por Mr. Noyes, en el que se separaban las funciones amorosas de las procreativas. Se afirmó que la mayoría de aquellos niños eran notablemente despiertos y saludables. Pero prevaleció el espíritu monógamo y, así, cuando en 1879 el asunto se sometió a votación sólo tres votos apoyaron la continuación de la experiencia."

"Un arqueólogo de la Institución Carnegie de Washington ha efectuado, en las afueras de la ciudad nicaragüense de Managua, un descubrimiento que promete ser de suma importancia. Se trata de las huellas de las pisadas que dejaron, hace de 2000 a 5000 años, personas que huían de una erupción volcánica. Estas huellas constituyen las pruebas conocidas más antiguas de la existencia de seres humanos en Centroamérica, donde muchos siglos después surgiría la más avanzada de las culturas del Nuevo Mundo. A juzgar por el tamaño de sus pies, eran individuos bastante bajos. Al parecer se dirigían a un lago cercano huyendo de la erupción."

"La revista *Journal of the American Medical Association* cifra en unos 10.000 los niños americanos traídos al mundo con ayuda de métodos de procreación por encargo, técnicamente llamada inseminación artificial. Las zonas del centro y del litoral atlántico de Estados Unidos presentan las tasas más altas de niños engendrados por este procedimiento. Más del 97 por ciento del total de embarazos dieron bebés vivos y normales. El número de abortos y fetos malogrados resultó sólo un quinto de la proporción habitual."

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: "En el caso del túnel bajo el Canal de la Mancha, si se construyera, éste proporcionaría sin duda una ruta militar subterránea, la cual, si alguna vez la asediara un enemigo, estaría protegida de los ataques por la Armada Británica. Sin embargo, el ferrocarril tubular que discurriera por su lecho sí estaría expuesto a la dinamita en cualquier punto del trayecto. Más aún. En virtud de su propia construcción, al aflorar en la playa dejaría expuesta a fuego naval directo una longitud no inferior a un kilómetro entre pleamar y bajamar."

"La máquina patentada por Mr. Henry C. Ross, de Ipava (Illinois) está diseñada para que el ciclista la propulse con facilidad y sin peligro. Una abrazadera fija a las palancas de los pedales el mecanismo de trinquete que acciona a las ruedas. A los extremos exteriores de los ejes están unidas unas barras lo bastante largas para llegar hasta el suelo. Alzando la palanca curva del freno, el eje gira y abate hacia el suelo las puntas de las barras. Este uniciclo se conduce fácilmente merced a los asideros de los brazos que suben desde los manguitos hacia ambos lados."

El complejo del Cabo Ortegal

Restos de corteza oceánica, secciones de zonas orogénicas profundas y fragmentos de manto superior terrestre aparecen en varias unidades estructurales de un complejo geológico en la región del Cabo Ortegal

José I. Gil Ibarguchi y Jacques Girardeau

De acuerdo con la teoría de la tectónica de placas, la parte superior de la Tierra, la litosfera, se divide en seis placas principales y varias menores que se mueven unas respecto de otras. Las colisiones entre bloques continentales pueden dar lugar en ocasiones al emplazamiento de fragmentos de litosfera oceánica (ofiolitas), relativamente densa, sobre corteza continental menos densa (procesos de obducción). Por otra parte, el estudio de las cadenas de colisión recientes (e.g., Himalaya) ha mostrado que, durante la colisión continental, las placas continentales pueden verse afectadas por grandes cabalgamientos intracorticales que permiten el ascenso de los materiales de la discontinuidad o interfase entre corteza y manto subcontinental: asociaciones peridotitas-granulitas.

En el caso de las cadenas antiguas muy erosionadas, estos materiales deberían poder ser observables en afloramientos de la superficie terrestre. De hecho, tales asociaciones, así como restos de ofiolitas, se distinguen a menudo en el seno de la Cadena Orogénica Herciniana; constituyen los complejos alóctonos del noroeste de la península Ibérica y, en particular, el Complejo del Cabo Ortegal, uno de los mejores puntos de observación de los procesos y materiales mencionados. (Alóctono se contrapone a autóctono y denuncia, en geología, lo que está allí venido de otra parte.)

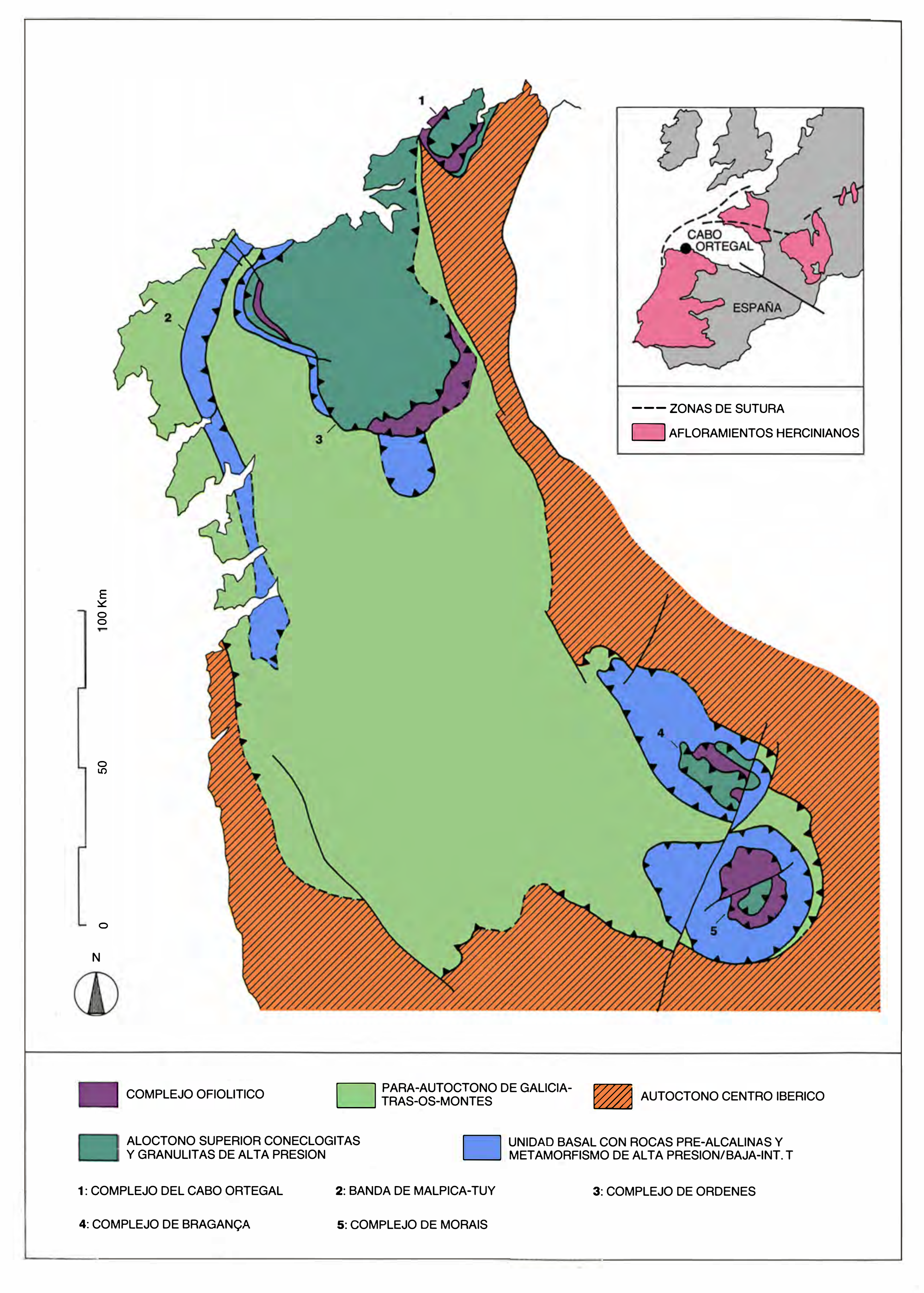
Los complejos de Cabo Ortegal, Ordenes y Malpica-Tuy en España y de Bragança y Morais en Portugal se consideraron, durante algún tiempo, unidades total o parcialmente enraizadas pertenecientes a un zócalo antiguo reactivado durante la Orogénesis Herciniana. Hoy se sabe, sin embargo, que constituyen restos de unidades estructurales exóticas emplazadas sobre corteza autóctona, o paraautóctona, del continente Gondwana en el noroeste ibérico.

Los complejos están constituidos por unidades yuxtapuestas, imbricadas tectónicamente, que exhiben características litológicas, geocronológicas y tectono-metamórficas bien diferenciadas. Los materiales de los niveles estructurales más altos registran una complicada historia tectonotérmica desarrollada durante varios episodios a lo largo del Paleozoico Inferior y Medio; es decir, se habrían originado en relación con el ciclo orogénico Caledoniano desde hace 500 hasta hace unos 420 millones de años. Estos materiales probablemente fueron amalgamados antes de incorporarse al continente Gondwana durante el ciclo herciniano (Paleozoico Superior) desde hace 380 hasta hace 280 millones de años aproximadamente. Las unidades estructurales más bajas corresponden al margen pasivo del continente Gondwana; se llama margen pasivo al que comprende la plataforma continental, el talud continental y el glacis continental, una pendiente muy débil. Esas unidades estructurales, que comprenden también secuencias oceánicas formadas hacia el exterior del continente, registran los primeros indicios de la actividad compresiva herciniana y de la acreción continental. El emplazamiento de los complejos en su posición actual se relaciona con las fases iniciales de deformación herciniana, mientras que la geometría actual de grandes pliegues (sinformes) sería el resultado de las fases finales de dicha deformación.

De todos estos complejos, el de Cabo Ortegal es el que ofrece las mejores condiciones de afloramiento debido a su posición junto al mar y a la forma de la costa que lo rodea casi por completo. Algunas de las características distintivas del Complejo de Cabo Ortegal, como la abundancia de rocas máficas y ultramáficas, ricas en hierro y magnesio, fueron ya mencionadas por Guillermo Schulz en 1835. Asimismo, José Macpherson en 1881 y 1883 ya hizo algunos estudios petrográficos de los materiales del Complejo. Sin embargo, fue Isidro Parga Pondal, con la publicación de los mapas geológicos de La Coruña y Galicia en 1956 y 1963, respectivamente, quien realizó el primer estudio con cierto detalle de la petrografía de las rocas de dicho macizo cristalino. Como resultado de la cooperación iniciada en 1955 entre el Laboratorio Geológico de Laxe (La Coruña), dirigido por Parga Pondal, y el equipo del Instituto Geológico y Mineralógico de la Universidad de Leiden (Holanda), dirigido por Emile Den Tex, se realizaron diversos estudios sobre la petrología, geoquímica, estructura, geocronología y geofísica del Complejo y materiales circundantes.

JOSE IGNACIO GIL IBARGUCHI y JACQUES GIRARDEAU han venido colaborando desde hace algún tiempo en el estudio de las rocas máficas y ultramáficas del noroeste de la península Ibérica. Gil Ibarguchi, profesor de petrología y geoquímica en la Universidad del País Vasco, se formó en las universidades de Oviedo y París VI, doctorándose en la Autónoma de Barcelona con una tesis sobre rocas ígneas y metamórficas de Galicia. Girardeau es investigador del Instituto de Física del Globo de París y profesor en la Universidad de París VII, donde se doctoró con una tesis sobre ofiolitas de la zona de sutura Yarlung Zangbo en el Tíbet.

1. SECTOR NOROESTE del Macizo Ibérico, que abarca varios complejos alóctonos de España y Portugal. Consideradas antaño unidades total o parcialmente enraizadas de un zócalo antiguo, se sabe hoy que constituyen restos de unidades estructurales exóticas emplazadas sobre corteza del continente Gondwana.



1
2
3
4
5
CABO
ORTEGAL
ESPAÑA
ZONAS DE SUTURA
AFLORAMIENTOS HERCINIANOS
100 Km
50
0
N
COMPLEJO OFIOLITICO
PARA-AUTOCTONO DE GALICIA-TRAS-OS-MONTES
AUTOCTONO CENTRO IBERICO
ALOCTONO SUPERIOR CONECLOGITAS Y GRANULITAS DE ALTA PRESION
UNIDAD BASAL CON ROCAS PRE-ALCALINAS Y METAMORFISMO DE ALTA PRESION/BAJA-INT. T
1: COMPLEJO DEL CABO ORTEGAL
2: BANDA DE MALPICA-TUY
3: COMPLEJO DE ORDENES
4: COMPLEJO DE BRAGANÇA
5: COMPLEJO DE MORAIS



2. A PESAR DE LA INTENSA DEFORMACION Y RECRISTALIZACION sufridas por los materiales del complejo ofiolítico, en muchos casos resulta todavía posible reconocer las relaciones estructurales primitivas, así como el tipo de protolitos ígneos que originaron esta unidad. En la fotografía se observa un antiguo filón de dolerita que corta una roca gabroica de la Formación Candelaria; en la actualidad ambas rocas presentan asociaciones metamórficas de las facies de las anfibolitas (hornablenda, plagioclasa, granate y epidota).

De las diversas tesis doctorales realizadas por los investigadores holandeses destaca la de Vogel en el año 1967, quien reconoció y describió la mayor parte de los tipos litológicos hallados hasta la fecha en el Complejo, y ha servido de base para los posteriores estudios e interpretaciones realizados sobre el mismo.

Coincidiendo prácticamente con el abandono de las investigaciones por parte de los autores holandeses (la última tesis sería la de Kuijper en 1979), se iniciaron los trabajos de varios equipos de universidades españolas (Oviedo, Salamanca, Madrid), quienes, en colaboración, en ocasiones, con universidades de otros países, han realizado en los últimos años aportaciones sumamente interesantes para el mejor conocimiento de la geología del Complejo de Cabo Ortegal.

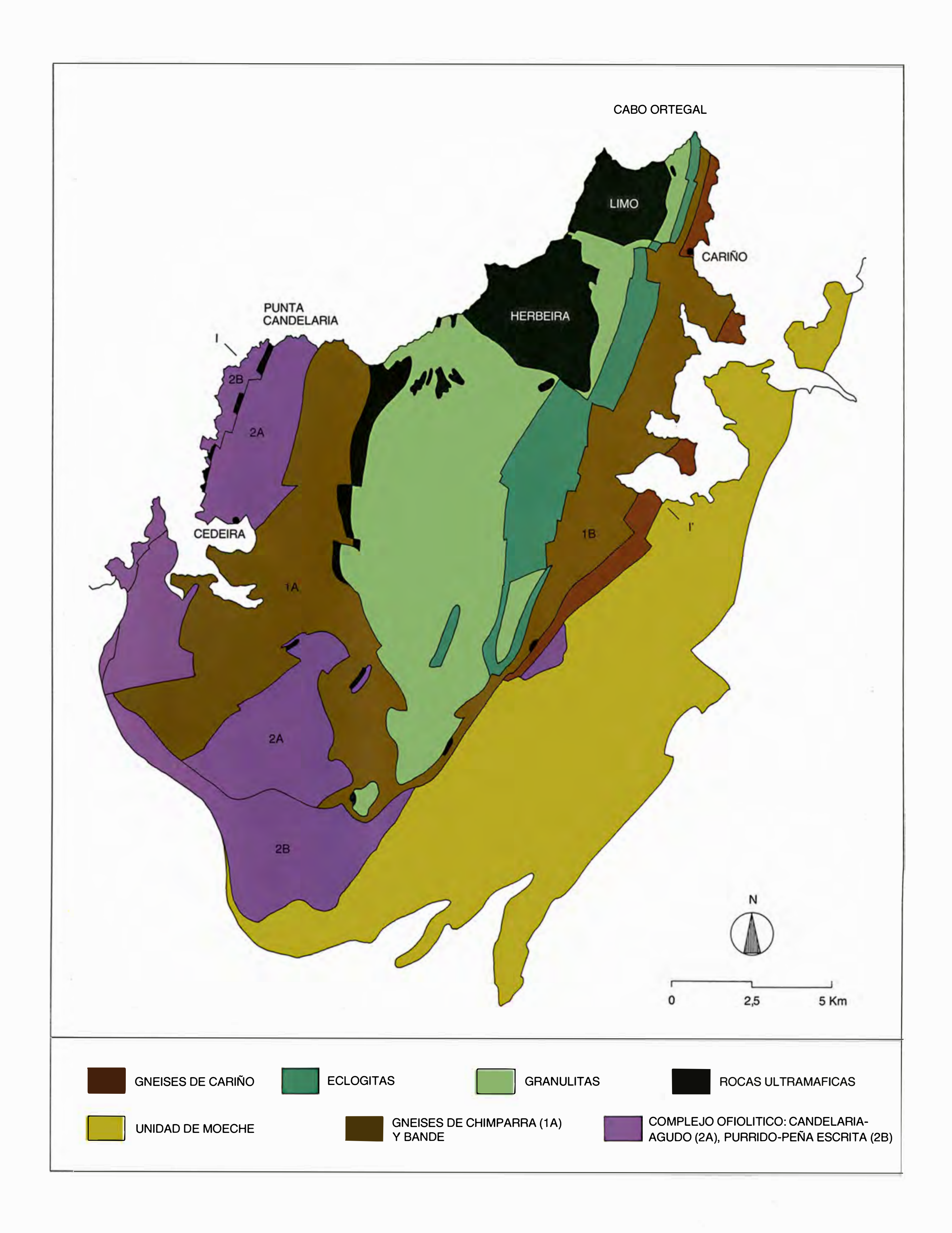
En el Complejo de Cabo Ortegal pueden distinguirse tres unidades estructurales principales, o dominios estructurales, cada uno de los cuales está a su vez compuesto por varias subunidades imbricadas tectónicamente. De abajo arriba estas unidades son: la unidad basal o alóctono inferior, el complejo ofiolítico, y el alóctono superior.

El alóctono inferior, también denominado unidad de Moeche en la región del Cabo Ortegal, comprende rocas sedimentarias y restos de una serie ofiolítica recristalizados en condiciones de baja temperatura y probablemente baja presión (facies de los esquistos verdes), junto con rocas afectadas por metamorfismo de alta presión y temperatura elevada (gneises y eclogitas). La diversidad y el alto grado de deformación de la mayor parte de estos materiales sugiere que se trata de una zona de "mezcla tectónica", originada durante las fases de tectónica tangencial herciniana y constituida por varios grupos litológicos yuxtapuestos.

En los complejos de Ordenes, Bragança y Morais la unidad más baja (alóctono inferior) aparece mejor caracterizada. Los datos petrológicos y geoquímicos indican en esos casos que los protolitos (basaltos alcalinos a toleíticos y rocas ígneas ácidas peralcalinas entre otros) del alóctono inferior se formaron en un medio continental afectado por un régimen distensivo, probablemente el antiguo margen pasivo del continente Gondwana, que evolucionó hacia una apertura oceánica antes del metamorfismo.

Este metamorfismo fue diacrónico y de características variables de unos sitios a otros. Tuvo lugar hace 360-370 millones de años y llegó a condiciones de unos 600 °C y más de 12 kilobares en los sectores noroccidentales —banda de Malpica-Tuy, donde llegaron a formarse eclogitas—, mientras que se desarrolló hace unos 330-340 millones de años y a menor presión y temperatura (400 °C y unos 10 kilobares) en los sectores meridionales —dominio Centro Transmontano, donde se formaron esquistos con inosilicato glaucofana y piroxeno jadeítico—. El metamorfismo y deformación de esta unidad, al afectar al antiguo margen pasivo del continente Gondwana, marcaría el inicio de la acreción continental y el final de los procesos, inversos, de obducción o cabalgamiento y subducción o hundimiento que precedieron a la colisión herciniana. El carácter variable y diacrónico del metamorfismo sugiere un proceso de colisión oblicua, relacionado probablemente con fenómenos de cabalgamiento y dislocación

3. GABROS, BASALTOS Y PLAGIOGRANITOS (niveles claros) de la Formación Candelaria muestran los signos de la intensa deformación, acompañada de recristalización en condiciones de la facies de las anfibolitas (unos 700 °C de temperatura y 8 kilobares de presión), que afectó a los materiales de la unidad ofiolítica del Complejo del Cabo Ortegal. Como resultado de los procesos de deformación, las rocas ígneas primitivas se han transformado en anfibolitas y gneises con diversas texturas y estructuras (superposición de pliegues y bandas de cizalla entre otras).

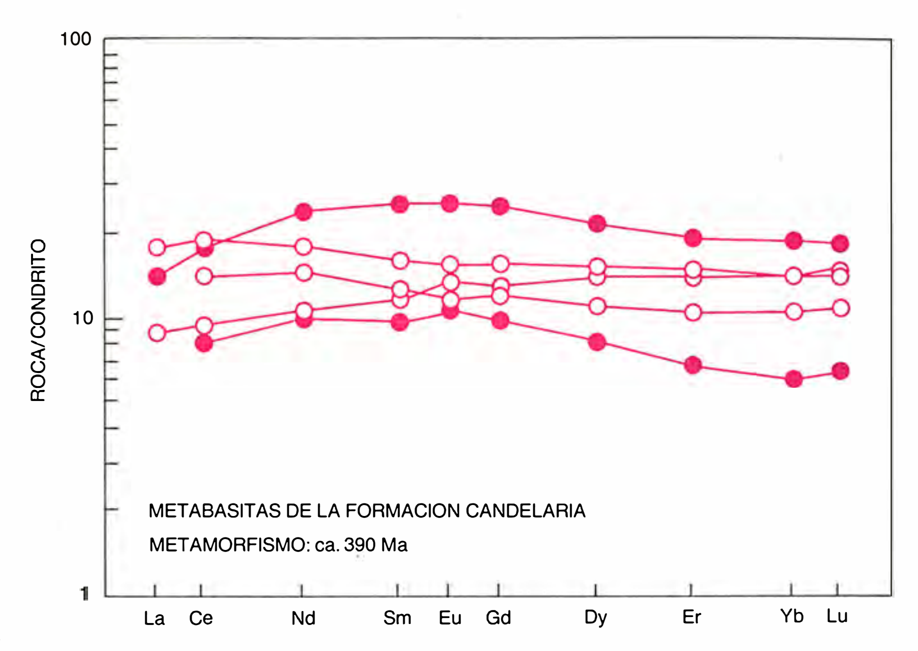


4. GEOLOGIA DEL COMPLEJO DEL CABO ORTEGAL, que abarca tres unidades estructurales principales, cada una de las cuales está a su vez compuesta por varias subunidades imbricadas: unidad de Moeche, complejo ofiolítico y complejo alóctono superior.

intracontinentales que provocaron un cambio en la orientación de los esfuerzos y en los mecanismos de deformación y recristalización a medida que progresaba la colisión.

Las unidades que presentan en mayor proporción y en mejores condiciones de observación los materiales más característicos del Complejo del Cabo Ortegal (eclogitas, granulitas y peridotitas) son las dos unidades que aparecen estructuralmente por encima de la unidad de Moeche.

Inmediatamente por encima de la unidad de Moeche, y apoyándose asimismo en el paraautóctono de la Zona Centro Ibérica, se sitúa una unidad constituida por materiales de un complejo ofiolítico con metamorfismo regional en facies de las anfibolitas. Estos materiales aparecen en varias formaciones (Purrido, Peña Escrita, Agudo y Candelaria), donde es posible reconocer la existencia de antiguos gabros, basaltos, diques de diabasa y plagiogranitos. Unidades análogas y en similar posición estructural aparecen en los complejos de Bragança, Ordenes y Morais. En los dos últimos se encuentra, asimismo, gran cantidad de rocas ultramáficas características de secuencias ofiolíticas, tales como harzburgitas, dunitas y wehrlitas, asociadas a las rocas básicas. La geoquímica de las rocas básicas, con espectros generalmente planos o empobrecidos en tierras raras ligeras junto con un fraccionamiento limitado, sugiere una afinidad oceánica para los protolitos básicos del complejo ofiolítico. Algunas rocas básicas enriquecidas en elementos incompatibles podrían corresponder a islas oceánicas dentro de la corteza oceánica; asimismo, la asociación en algún caso de rocas básicas con abundantes gneises (Ordenes) podría indicar un origen ligado a un arco volcánico (cuenca postarco) para ciertas partes del complejo ofiolítico.



5. CONTENIDO EN TIERRAS RARAS de las metabasitas de la Formación Candelaria (distribución normalizada en función del contenido condrítico). Los espectros empobrecidos en tierras raras ligeras junto con el fraccionamiento limitado desde las tierras raras ligeras a las pesadas sugieren una afinidad oceánica para los protolitos básicos del complejo ofiolítico.

La posición estructural del complejo ofiolítico sobre secuencias autóctonas a paraautóctonas del continente Gondwana (región del Cabo Ortegal) y sobre materiales de margen pasivo continental (alóctono inferior en Ordenes, Bragança y Morais) sugiere la correspondencia de este complejo ofiolítico con un océano asociado a este margen (océano Rheic). No obstante, la extensión del hipotético océano o cuenca marginal y la posición de los diversos restos ofiolíticos con anterioridad al metamorfismo no han podido establecerse hasta la fecha de un modo preciso. La edad de los protolitos (rocas originarias) del complejo ofiolítico tampoco se conoce con exactitud. Algunas calizas asociadas a restos ofiolíticos desmembrados en la unidad de Moeche tienen menos de 470 millones de años. Sin embargo, está aún por establecerse la correlación entre estos restos y los materiales del complejo ofiolítico.

Sí se conoce con bastante precisión la edad del metamorfismo del complejo ofiolítico. Las edades de los anfíboles obtenidas mediante el método de los isótopos del argón ($^{40}Ar/^{39}Ar$) en Ortegal y en Morais sugieren que dicho proceso tuvo lugar durante el Devónico Inferior, hace unos 390 millones de años. El metamorfismo progrado —así se califica cuando la transformación de la roca ocurre a presión y temperatura crecientes— y la deformación (subducción abortada) probablemente estuvieron relacionados con el cierre del océano y la obducción de los macizos granulíticos/eclogíticos que observamos hoy superpuestos estructuralmente a la unidad ofiolítica. Este proceso puede interpretarse como un primer estadio de la actividad compresiva herciniana, y marcaría el final de un período esencialmente distensivo en el continente Gondwana.

En el alóctono superior del Complejo del Cabo Ortegal puede distinguirse una unidad estructural formada esencialmente por gneises migmáticos con algunas intercalaciones de metabasitas (formaciones "gneises bandeados" y "gneises de Chimparra") y otra que comprende gran cantidad de materiales básicos y ultrabásicos (dominio de Concepenido-La Capelada). Unidades similares existen en los otros complejos (Agualada, gneises de Bragança y Sobrado-Mellid). La formación no migmática "gneises de Cariño" ocupa una extensión reducida y no presenta señales de metamorfismo de alta presión. Esta formación posee características litológicas y tectono-metamórficas comparables a las de las formaciones esquistoso-gnéisicas de Betanzos-Arzúa (Ordenes) y Lagoa (Morais), sobre cuyo origen se dispone de pocos datos por el momento.

Las metabasitas analizadas de la unidad gnéisica poseen composición de basaltos intraplaca; exhiben espectros con fraccionamiento continuo ricos en tierras raras ligeras y otros elementos traza. Estos datos, junto con las relaciones de campo y los datos petrográficos (verbigracia, la presencia de texturas ofiolíticas relictas) sugieren para los protolitos de las mismas un origen filoniano en un contexto de adelgazamiento de la corteza continental, que precedería al metamorfismo.

La mayoría de los gneises de dicha unidad poseen una composición psamo-pelítica: (cuarzo-feldespato-granate-distena/sillimanita-biotita-rutilo ± moscovita). Algunos tipos ricos en anfíbol-granate-zoisita sugieren, sin embargo, que parte de los gneises po-

dría tener un origen volcano-sedimentario, con participación de materiales volcánicos básicos y relacionado con el proceso distensivo.

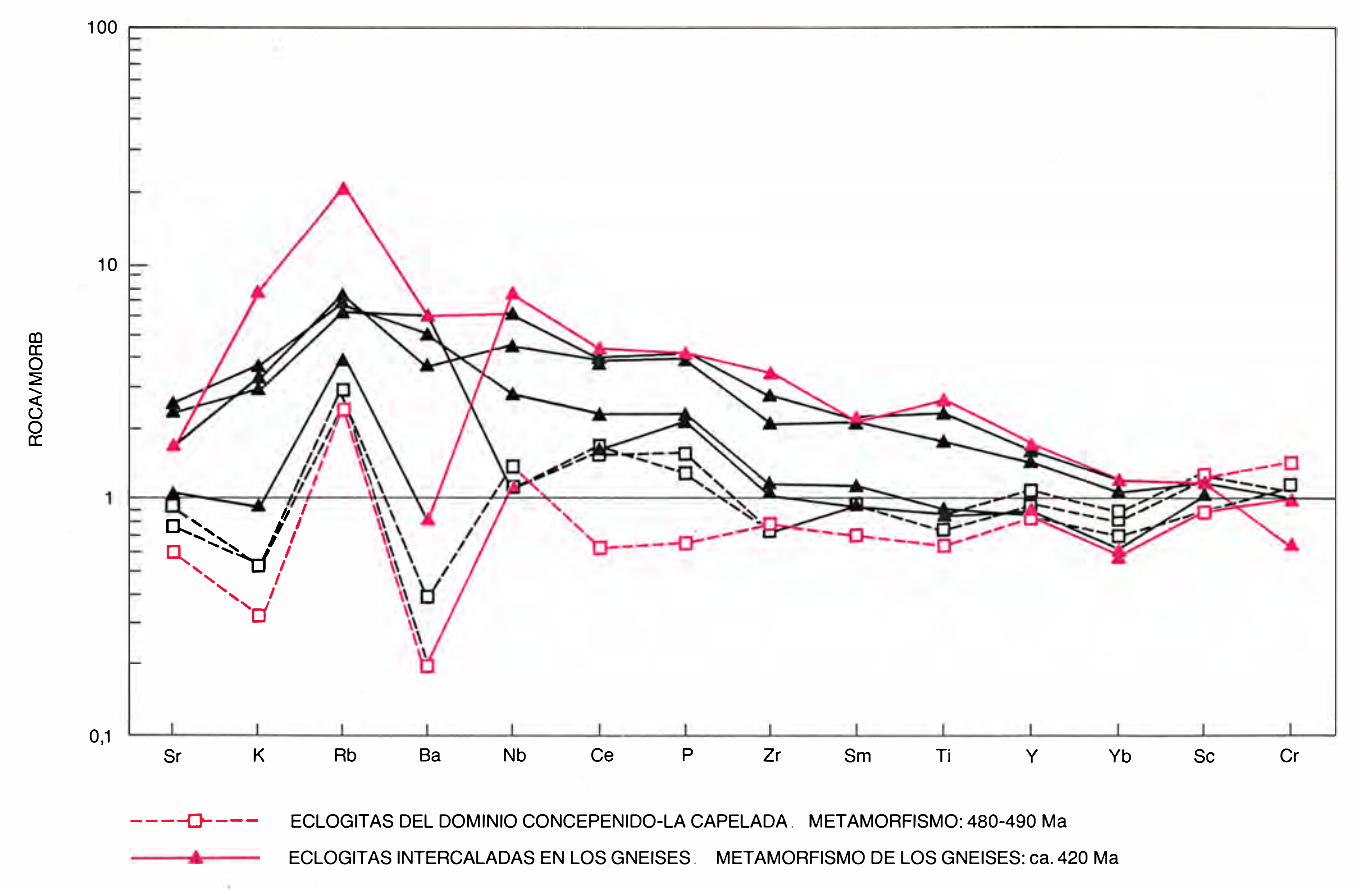
La extensión, afinidad palinspástica y edad de los protolitos de este dominio estructural del alóctono superior se desconocen, aunque las intersecciones superiores U-Pb de zircones de los gneises registran en todos los casos valores por encima de 2000 millones de años, lo que, en cualquier caso, abona la presencia de un componente cortical muy antiguo en los protolitos de los gneises.

La recristalización de los protolitos básicos originó rocas con granate y onfacita con o sin plagioclasa, esto es, verdaderas eclogitas y rocas que podríamos denominar gneises con onfacita (rocas con granate-onfacita-plagioclasa±anfíbol±biotita), mientras que las rocas pelíticas y cuarzofeldespáticas fueron transformadas, en su mayor parte, en gneises migmáticos. Las condiciones de presión y temperatura alcanzadas en los gneises y metabasitas de la unidad gnéisica fueron de unos 700 °C y 15 kilobares. La datación mediante el método uranio-plomo de zircones de los gneises (intersección inferior) indica que el metamorfismo tuvo lugar hace unos 420 millones de años.

Cabe señalar que estos gneises migmáticos, con granate, distena y rutilo como accesorios, son muy diferentes de las formaciones migmáticas originadas durante la Orogénesis Herciniana en el autóctono-para-autóctono de la Zona Centro Ibérica, donde son frecuentes las asociaciones con cordierita, andalucita y esfena, indicativas de una presión menor durante el metamorfismo. Esto sería debido a los diferentes mecanismos geotectónicos que operaron en cada caso: subducción de corteza continental adelgazada en el caso de la unidad gnéisica de los complejos alóctonos (Cabo Ortegal y similares) y recuperación térmica en corteza continental engrosada tectónicamente (duplicada) en el autóctono-para-autóctono.

El dominio de Concepenido-La Capelada en el alóctono superior está constituido esencialmente por granulitas con granate y clinopiroxeno, eclogitas y rocas ultramáficas. Los contactos entre eclogitas, granulitas y rocas ultramáficas están marcados por zonas de intensa deformación por cizalla. Existe una importante retrogradación en facies de las anfibolitas a lo largo de estas zonas, así como de otras zonas de cizalla dispersas, más o menos paralelas a las anteriores. Este metamorfismo, desarrollado en condiciones de temperatura y presión decrecientes, se relacionaría con los procesos de ascenso y emplazamiento del complejo en su posición actual.

Las eclogitas aparecen en una banda de más de 15 kilómetros de largo por 0,1 o 2 km de ancho. Constituye uno de los mayores afloramientos que se conocen de este tipo de rocas. Las eclogitas forman a menudo relieves topográficos prominentes (el Pico Concepenido entre otros), así como los acantilados de la punta del Cabo Ortegal. La mayoría de las eclogitas poseen una composición similar a la de los basaltos actuales de la dorsal medioocéanica. Desconocemos la edad de los protolitos. Algunas variedades de eclogitas ricas en magnesio y aluminio y pobres en tierras raras derivan probablemente de acumulados de tipo troctolítico. Un rasgo peculiar de estas últimas es la riqueza



6. CONTENIDO EN TIERRAS RARAS Y OTROS ELEMENTOS TRAZA de las eclogitas del dominio de Concepenido-La Capelada y de las eclogitas intercaladas en los gneises (distribución normalizada en función del contenido de los basaltos de la dorsal medioocéanica, o MORB). Ignorando las variaciones en K, Rb y Ba —elementos probablemente más móviles que el resto durante los procesos metamórficos— se observa que las eclogitas del dominio de Concepenido-La Capelada poseen espectros bastante similares a los de los MORB, lo que traduciría un origen en un contexto oceánico para los protolitos de estas rocas. Las eclogitas intercaladas en los gneises poseen espectros claramente más enriquecidos y fraccionados; ello, unido a su aspecto filoniano y a la asociación con gneises, sugiere un origen para los protolitos en un contexto de distensión cortical.

ocasional en cromo de la onfacita y la presencia, junto con el granate y el piroxeno, de abundante distena y de estaurolita como mineral accesorio.

Protolitos de tipo troctolita con espinela debieron originar, asimismo, las rocas con granate-zoisita-hornablenda, intercaladas ocasionalmente en las eclogitas, en las cuales se ha hallado distena cromífera ($> 4\%$ Cr_2O_3) y estaurolita verde extraordinariamente rica en magnesio y cromo ($> 74\%$ X_{Mg}, $>6\%$ Cr_2O_3).

El metamorfismo eclogítico alcanzó unas condiciones mínimas de unos 800 °C de temperatura y presión superior a los 17 kilobares; se ha datado en torno a 480 millones de años mediante el método uranio-plomo (aplicado a zircones de eclogitas).



7. GRANULITAS DEL COMPLEJO DEL CABO ORTEGAL; presentan una notable heterogeneidad litológica. La mayor parte de las granulitas poseen composición básica a intermedia (andesítica), siendo frecuentes los tipos litológicos ricos en granate y plagioclasa como los de la fotografía; menos abundantes son las rocas de quimismo más básico mucho más ricas en piroxeno y granate.

Las granulitas con granate y clinopiroxeno, (plagio)pirigarnitas, afloran en buena parte de la Sierra de La Capelada y ocupan la mayor extensión en el alóctono superior. Las granulitas constituyen una formación heterogénea, en la que son abundantes los tipos litológicos ricos en granate y en plagioclasa. La mayor parte de las granulitas poseen una composición entre básica e intermedia; hay intercalaciones locales de gneises y de rocas carbonatadas. Los datos geoquímicos disponibles (incluidos los obtenidos de isótopos de neodimio y estroncio) sugieren que los protolitos de las granulitas se formaron en un ambiente de arco volcánico próximo a un margen continental, siendo la edad de los protolitos de unos 480-490 millones de años según se desprende de las relaciones isotópicas de plomo en los zircones. El metamorfismo granulítico alcanzó condiciones de unos 800 °C y más de 13,5 kilobares, lo que significa que las granulitas se formaron en condiciones de presión bastante más elevada que la mayoría de las granulitas conocidas de otras partes del mundo donde, a diferencia de las de Cabo Ortegal, son frecuentes asociaciones de más baja presión que contienen ortopiroxeno (Adirondacks, India y Hoggar, entre otras). No se ha establecido todavía la edad del metamorfismo granulítico del Complejo del Cabo Ortegal; si bien para granulitas similares del Complejo de Ordenes se ha obtenido una edad de 470-480 millones de años, a través del análisis de la concentración de uranio y plomo en muestras de zircón y monacita.

Estos datos mueven a pensar en acontecimientos sincrónicos eclogíticos y granulíticos hace unos 480 millones de años. Los protolitos de las granulitas serían subcontemporáneos con el metamorfismo de alto grado. Eclogitas y granulitas pudieron haberse formado en un régimen convergente, con evolución hacia la formación de un margen activo, donde tanto los materiales oceánicos como los del arco volcánico se vieron expuestos al metamorfismo de alta presión. Estaríamos, pues, ante un caso de granulitas sin acreción, formadas no sólo en virtud de un aumento de temperatura, sino también de un aumento de presión, y no en el caso de granulitas representativas de una antigua corteza inferior. La extensión e historia tectónica previas de este margen activo no se conocen por el momento. En el contexto mencionado, los metasedimentos y ortogneises de las formaciones tipo gneises de Cariño (parte superior de Ordenes y Morais) podrían representar secciones superiores del margen continental, por encima de la zona de subducción asociada.

Las rocas ultramáficas del alóctono superior forman extensos cuerpos laminares de harzburgitas con espinela y piroxenitas. En menor proporción aparecen dunitas. Los dos cuerpos más importantes son los denominados macizos de Limo y Herbeira, que originan espectaculares acantilados a lo largo de la costa noroeste del complejo. En el macizo de Herbeira se distingue un fragmento excepcionalmente bien conservado de manto superior heterogéneo. Se trata de una masa kilométrica de harzburgitas que contienen un gran volumen de piroxenitas. Las piroxenitas se concentran en una lámina de unos 300 metros de espesor por unos 3 kilómetros de largo. Dicha lámina muestra una alternancia de rocas ultramáficas, esencialmente piroxenitas (websteritas y clinopiroxenitas masivas) y dunitas, sin ninguna ritmicidad aparente. La alternancia se supone que posee, en parte, un origen magmático primario y sería el resultado de la cristalización de magmas que se han intruido, en forma de diques, en la peridotita bajo condiciones propias del manto.

El origen suboceánico o subcontinental de las rocas ultramáficas no se ha demostrado todavía con precisión. Si bien los datos sobre la mineralogía de estas rocas indican afinidades oceánicas, la abundancia de piroxenitas podría constituir un argumento en favor de un origen sub-continental.

En cualquier caso, las rocas ultramáficas presentan una intensa deformación, así como una fuerte recristalización, anteriores al emplazamiento de las mismas en su posición actual. Una primera recristalización tuvo lugar a gran profundidad (a unos 25-30 kilobares), probablemente en condiciones mantélicas, mientras que una recristalización subsecuente, quizás en el mismo contexto orogénico que dio lugar a las eclogitas y granulitas, provocó la transformación de espinela en granate (en la mayor parte de las piroxenitas) en condiciones de unos 750-800 °C y más de 15 kilobares. Por el momento no se dispone de datos sobre la edad de los protolitos, ni de los procesos de recristalización.

Como hecho curioso cabe citar la presencia de demantoide en piroxenitas serpentinizadas; se trata de un tipo de granate con composición de andradita, cuyo hermoso color verde



8. CRISTALES DE DEMANTOIDE con composición de andradita prácticamente pura en piroxenitas serpentinizadas del macizo de Herbeira. Debido a su color y gran capacidad de dispersión de la luz (mayor que la del diamante), el demantoide es uno de los granates gema más raros.

pálido y gran dispersión (mayor que la del diamante) hacen que sea uno de los granates gema más raros y de cotización más alta.

Los procesos de metamorfismo retrógrado —así se denomina cuando la transformación de la roca ocurre a presión y temperatura decrecientes— en los dos dominios del alóctono superior, esto es, la unidad gnéisica y el dominio Concepenido-La Capelada, tuvieron lugar en relación con el desarrollo de cizallas dúctiles. En la unidad gnéisica, la retrogradación se ha fechado en unos 370-390 millones de años, mediante la aplicación de métodos de datación por desintegración radiactiva (Rb-Sr, $^{40}Ar/^{39}Ar$) a las micas y anfíboles de gneises, granulitas, eclogitas y rocas ultramáficas. Estos datos apuntan hacia una historia relativamente larga de reactivación durante el ascenso hacia niveles superiores de la corteza. Las edades obtenidas podrían estar relacionadas con la reactivación del alóctono en su conjunto durante un proceso de obducción sobre la unidad ofiolítica infrayacente en un marco de Orogénesis Herciniana.

Así pues, a partir de los datos sobre edades de protolitos, afinidades geoquímicas, condiciones de recristalización y mecanismos de deformación podríamos suponer, para los diversos dominios con características contrastadas que aparecen en el Complejo del Cabo Ortegal y complejos similares del noroeste del Macizo Ibérico, la siguiente evolución estructural y térmica.

Primero. Durante el Paleozoico Inferior, hace aproximadamente 480 millones de años, tuvo lugar un primer episodio de metamorfismo de alta presión, relacionado con procesos de subducción, que aparece registrado en diferentes unidades litológicas del alóctono superior: eclogitas, granulitas de alta presión y, probablemente también, en las rocas ultramáficas. Los protolitos afectados por este metamorfismo de alta presión proceden de la litosfera oceánica, de materiales de arco volcánico subcontemporáneos con el metamorfismo y de fragmentos del manto superior, estos últimos de afinidad dudosa. Otras unidades del alóctono superior, de naturaleza predominantemente gnéisica, sufrieron su propio metamorfismo de alta presión, que llegó a transformar en eclogitas las intercalaciones básicas; ocurrió ello en época algo más reciente: hace aproximadamente 420 millones de años. Los protolitos de las secuencias gnéisicas con intercalaciones de metabasitas eclogitizadas representan probablemente un ambiente continental sometido a un régimen distensivo.

El conjunto de elementos que componen el alóctono superior refleja procesos tectono-metamórficos (orogénicos) de alta presión, correlacionables, desde un punto de vista cronológico, con la Orogénesis Caledoniana. Dichos procesos se debieron de desarrollar en zonas más o menos alejadas del continente Gondwana; en principio, son independientes de cualquier historia registrada durante el mismo período en el substrato autóctono-para-autóctono de las diferentes zonas del Macizo Ibérico.

Segundo. La edad y situación previa de las diferentes unidades ofiolíticas infrayacentes no se conocen con precisión. Pero su posición actual, estructuralmente por encima de materiales del margen pasivo de Gondwana, permite suponer que pudieron originarse en relación con el proceso distensivo que afectó a este continente durante el Ordovícico-Silúrico. El metamorfismo progrado de las unidades ofiolíticas aconteció durante el Devónico Inferior. Este metamorfismo debió de desarrollarse en un ambiente colisional, aunque no llegaron a generarse asociaciones de alta presión.

Los anfíboles y micas asociadas a procesos de retromorfosis en las unidades del alóctono superior, así como los anfíboles de anfibolitas y (meta)plagiogranitos de las unidades ofiolíticas, poseen edades similares próximas a 380 millones de años. De ello cabe inferir que la yuxtaposición tectónica de los elementos del alóctono superior tuvo lugar al mismo tiempo que se produjo el metamorfismo progrado inicial del complejo ofiolítico y la retrogradación del alóctono superior.

Tercero. El terreno compuesto resultante —alóctono superior/complejo ofiolítico— se fue luego incorporando, por acreción, a Gondwana durante la colisión herciniana. La obducción de terrenos exóticos y ofiolita sobre secuencias del margen pasivo del continente Gondwana (protolitos del alóctono inferior incluyendo rocas volcánicas ácidas y básicas alcalinas) se tradujo en un metamorfismo regional de alta presión con deformación penetrativa asociada. Este metamorfismo es algo más antiguo y alcanzó condiciones algo más profundas en el sector norte, donde se formaron eclogitas de edad Devónico Superior. En el sur la edad del metamorfismo es Carbonífero Inferior y se formaron esquistos azules. Esa distribución sugiere un proceso de colisión oblicua durante la Orogénesis Herciniana, probablemente relacionado con una secuencia progresiva de cabalgamientos y dislocaciones intracontinentales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

PETROLOGY OF AN ECLOGITE- AND PYRIGARNITE-BEARING POLY-METAMORPHIC ROCK COMPLEX AT CABO ORTEGAL. NW SPAIN. De Vogel en *Leidse Geologische Mededelingen*, 40, 121-213, 1990.

PETROLOGY OF ECLOGITES AND CLINOPYROXENE-GARNET METABASITES FROM THE CABO ORTEGAL COMPLEX (NORTHWESTERN SPAIN). J. I. Gil Ibarguchi, M. Mendía, J. Girardeau y J. Peucat en *Lithos*, 25, 135-162, 1990.

Los orígenes de las estrellas

La infancia de las estrellas está dominada por violentas colisiones de gas. Más tarde llega la fusión nuclear, que les permite, ya maduras, arder sin cesar durante miles de millones de años

Steven W. Stahler

Si levantamos la mirada al cielo en una noche clara, lejos de las luces de la ciudad, contemplaremos una bóveda tachonada de estrellas. Abundan en número incontable. Por dar una cifra, se estima que habrá unos 100.000 millones sólo en la Vía Láctea. Y siguen naciendo todavía, transcurridos ya de 10.000 a 20.000 millones de años desde que comenzara su andadura el universo. ¿Cómo se crean las estrellas? ¿Qué cambios sufre una estrella joven antes de llegar al estado relativamente estable que presenta ahora nuestro Sol?

Para un físico, estrella es una bola de gas caliente que se mantiene unida en virtud de su propia gravedad. El calor y la presión generados por las reacciones nucleares internas, principalmente la fusión del hidrógeno para producir helio, evitan que la estrella colapse bajo la fuerza de su propia gravedad. Este sistema, de relativa sencillez, posee una trayectoria vital bien definida. Empieza con la condensación de una nube difusa de gas interestelar y llega su fin cuando la estrella, agotado su combustible nuclear, desaparece de la vista, ya sea en forma de enana blanca, de estrella de neutrones o de agujero negro.

Ante ese cuadro general, parecería que detallar la formación y la evolución primitiva de las estrellas no debiera presentar grandes dificultades. Pero la sutil interacción entre gravedad y presión térmica promueve un comportamiento de la joven estrella que resulta a veces desconcertante. Fijémonos, por ejemplo, en la evolución de la luminosidad, o cantidad de energía emitida por la superficie estelar por unidad de tiempo. La temperatura interna de una estrella joven es demasiado baja para instar la fusión del hidrógeno; cabría, pues, esperar que su luminosidad fuera también bastante baja, y aumentara cuando empezara la fusión del hidrógeno, para decaer luego de forma paulatina.

Resulta, por contra, que las estrellas muy jóvenes despiden un brillo intensísimo. Su luminosidad decrece al avanzar la edad, hasta alcanzar una cota mínima transitoria en el momento de la combustión del hidrógeno. En los albores de las estrellas concurren una amplia diversidad de procesos físicos, algunos de los cuales siguen sin entenderse; apenas hace veinte años, desde que los astrónomos comenzaran a tejer, a través de la teoría y la observación, una imagen coherente y pormenorizada.

Las estrellas son la condensación, bajo su propia gravedad, de complejos gigantes de nubes moleculares, que, invisibles para nuestros medios ópticos, se encuentran por doquier en los discos de las galaxias espirales. El término "molecular" alude a la forma molecular en que se halla el hidrógeno, componente principal del gas. Estos agregados constituyen las estructuras más masivas de la galaxia; llegan a medir hasta más de 300 años-luz.

Una consideración más fina pone de manifiesto que las estrellas parten de los núcleos densos, que son condensaciones singulares del interior de los complejos gigantes de nubes moleculares. Philip C. Myers, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, acuñó esa expresión en 1983, tras observar sistemáticamente sus propiedades y resaltar su papel en la formación de estrellas.

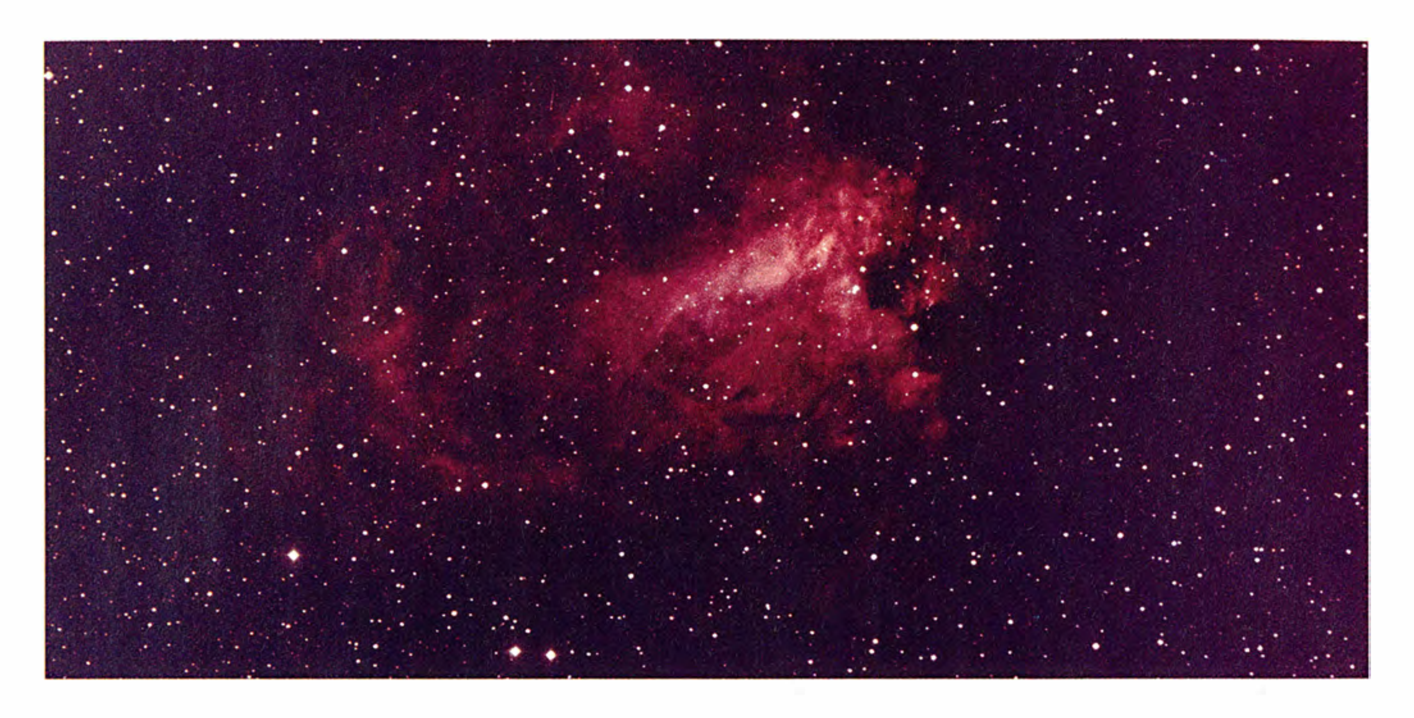
Para estudiar las propiedades de los núcleos densos, los astrónomos se valen de grandes radiotelescopios, los únicos capaces de detectar la débil radiación milimétrica emitida por las nubes. Esta radiación no proviene del hidrógeno molecular, sino de otras sustancias que, en pequeña cuantía, portan los núcleos: monóxido de carbono y monosulfuro de carbono, por ejemplo. Las emisiones de estos gases traza revelaron que un núcleo denso típico tiene un diámetro de algunos meses-luz, una densidad de 30.000 moléculas de hidrógeno por centímetro cúbico y una temperatura de 10 kelvins.

De estos datos se ha deducido que la presión del gas en un núcleo denso posee el valor adecuado para compensar la fuerza compresiva de la gravedad del propio núcleo. Por tanto, para formar una estrella, el núcleo debe contraerse a partir de un estado marginalmente inestable, es decir, aquel en el que la gravedad supere sólo ligeramente a la presión.

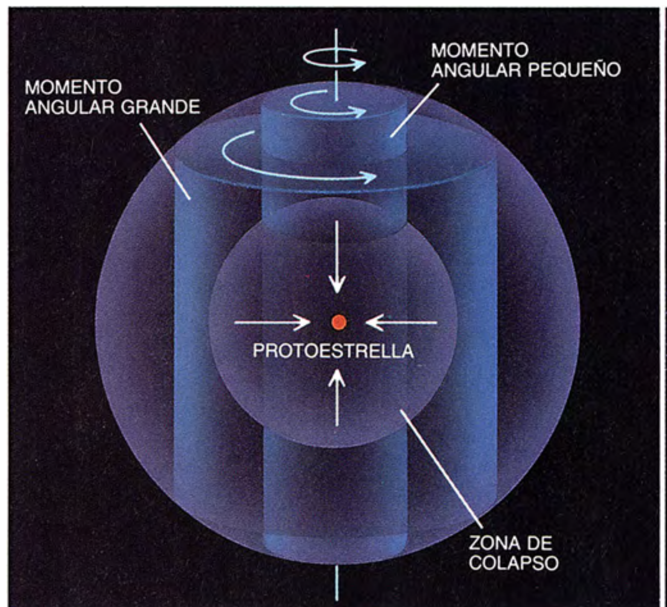
Seguimos sin acabar de comprender el proceso de condensación del propio núcleo, desde su complejo nebular molecular parental hasta llegar a ese estado marginalmente inestable. Pero los astrofísicos disponían de las herramientas necesarias para modelar la formación de estrellas, antes incluso del descubrimiento de los núcleos densos. En los años sesenta los teóricos usaron simulaciones con ordenador para determinar cómo se condensan las nubes que se hallan en estados inestables.

Aunque las simulaciones tomaban como base condiciones iniciales muy dispares, todas indicaron que las nubes que no se encuentran en una inestabilidad violenta se van condensando desde el centro hacia la periferia: el material del centro comienza a entrar en un verdadero colapso de caída libre mientras el gas exterior permanece estático. Poco a poco, la zona de colapso se va extendiendo hacia el resto de la nube.

STEVEN W. STAHLER, doctorado en 1980 por la Universidad de California en Berkeley, ha pasado por la Universidad de Cornell y el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. Desde 1985 viene enseñando física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. "Vivimos, escribe, en una época estimulante para el estudio de las estrellas jóvenes; quienes se dedican a su investigación se parecen a los que moran en un habitáculo obscuro donde comienza a hacerse la luz." Metáfora que en él, cinéfilo empedernido, tiene doble significación.



1. NEBULOSA OMEGA, en Sagitario. Distante de nosotros unos 5000 años-luz, es una región de formación de estrellas. Esta incubadora estelar muestra poco de su interior cuando se mira su luz visible (*arriba*), pero revela numerosas estrellas jóvenes en el infrarrojo (*abajo*).





2. LOS NUCLEOS DENSOS se contraen de dentro afuera. En un modelo muy idealizado (*izquierda*), el gas del interior de la esfera cae hacia la superficie de la protoestrella. Si el núcleo denso gira uniformemente, el momento angular se mantiene constante en cilindros centrados en el eje de rotación. La región de colapso se expande, engullendo materia de momento angular más elevado; esta materia no alcanza la protoestrella sino que gira alrededor de la misma formando un disco (*derecha*). La propia protoestrella se distorsiona rotacionalmente.

En la profundidad de la zona de contracción, las colisiones de gas empiezan a formar una estrella, dotada de apenas un segundo-luz de diámetro, una millonésima parte del tamaño del núcleo denso. Para una estrella de tales proporciones, la pauta global del colapso carece de importancia. Lo que cuenta es la velocidad de la acreción de masa, parámetro que designa la cuantía de materia por unidad de tiempo que cruza una capa esférica imaginaria y cercana al centro de la nube.

Frank H. Shu, de la Universidad de California en Berkeley, demostró, en 1977, que la velocidad de acreción de masa dependía sólo de la temperatura inicial de la nube. Cuanto más alta fuera la temperatura, tanto mayor sería la velocidad de acreción. Lo que, ejemplificando, indica que, en un tiempo comprendido entre 100.000 y un millón de años, se acumula en el centro de un núcleo denso en contracción una cantidad igual a la masa solar.

Recibe el nombre de protoestrella el objeto que se forma en el centro de la nube en contracción. La moderna teoría de las protoestrellas empezó a tomar cuerpo en 1969, cuando Richard Larson, de la Universidad de Yale, recreó el nacimiento estelar en una simulación informática del colapso de una nube. Quienes desarrollaron el trabajo pionero de Larson descubrieron las ventajas de separar, conceptualmente, protoestrella y nube a la hora de elaborar modelos del colapso. En otras palabras, la protoestrella en sí misma considerada vendría a ser una estrella ordinaria que posee una condición de contorno extraordinaria: el flujo de acreción entrante.

Al realizar estas simulaciones se puede modificar las propiedades del flujo de acreción para calibrar su efecto en la evolución de la protoestrella. En 1980, Shu, Ronald Taam, de la Universidad Northwestern, y yo actuamos de ese modo para establecer las propiedades de las protoestrellas cuya masa se pareciera a la solar. Más recientemente, y en colaboración con Francesco Palla, del Observatorio Arcetri de Florencia, he vuelto a usar este método para estudiar protoestrellas dotadas de una masa mayor.

A través de esas simulaciones, los astrónomos han desarrollado un modelo que describe la fase de protoestrella. Han descubierto que el gas entrante incide sobre la protoestrella a una velocidad muy elevada, tan alta que no puede frenarse gradualmente antes de alcanzar la superficie estelar. Por el contrario, se encuentra con un fuerte frente de choque (una brusca transición a una presión muy alta) que se opone de repente al gas. En la colisión, la temperatura del gas sube hasta casi el millón de kelvins, para enfriarse rápidamente por radiación hasta unos 10.000 kelvins; se deposita entonces capa a capa, formando la protoestrella.

El frente de choque encierra la clave del brillo de las estrellas jóvenes. Si la masa de una protoestrella iguala a la solar, la luminosidad que el gas genera al encontrar el frente de choque supera, de seis a 60 veces, el brillo solar. La intensa luminosidad de las estrellas jóvenes no se debe, pues, a la fusión nuclear, como sucede con las estrellas corrientes, sino a la energía cinética de la materia que es atraída por la gravedad.

Puede observarse la luminosidad de las protoestrellas, aunque no con telescopios ópticos. Todo el gas del espacio interestelar, incluido el que forma las estrellas, contiene "polvo", una mezcla de partículas sólidas de tamaño submicrométrico. En su alejamiento del frente de choque, los fotones van encontrando enormes cantidades de estos granos de polvo, que caen junto con el gas del núcleo denso original.

El polvo no puede alcanzar la superficie de la protoestrella, ya que el intenso calor del frente de choque lo vaporiza. Los astrónomos denominan intervalo de opacidad la parte del espacio donde se vaporiza el polvo. Corriente arriba, antes del intervalo de opacidad, las temperaturas, bajas, permiten la existencia de granos. Los granos fríos absorben los fotones generados en el choque y los reemiten con longitudes de onda mayores, fotones que, a su vez, son absorbidos por granos de polvo más lejanos.

Los fotones recorren, pues, un tortuoso camino a través del material de la nube hasta que su longitud de onda media descansa en el interior de la zona infrarroja del espectro electro-

magnético. Alcanzada la fotosfera de polvo, así llamamos Shu, Taam y yo a un radio que se extiende a unas horas-luz de la protoestrella, los fotones portan ya una longitud de onda demasiado grande para ser absorbidos por el polvo; al fin, pueden volar sin impedimentos hasta los telescopios de infrarrojo terrestres.

A pesar del refinamiento de los modernos detectores, los astrónomos no pueden afirmar con seguridad que los telescopios hayan registrado realmente las señales infrarrojas de las protoestrellas. Desde su lanzamiento en 1983, el *Satélite Astronómico de Infrarrojos* generó cientos de miles de imágenes de fuentes de radiación infrarroja puntiformes. Muchas de ellas parecen localizarse en el interior de núcleos densos; algunas sin duda deben ser protoestrellas. La inseguridad deriva de las limitaciones de los detectores, incapaces de distinguir las protoestrellas de las estrellas algo más viejas, enterradas también entre polvo y gas.

Para que pudiese realizarse una identificación positiva, los telescopios de radio o infrarrojos deberían estar capacitados para detectar el corrimiento Doppler de las líneas espectrales muy cerca de una fuente puntiforme infrarroja. El desplazamiento Doppler representaría el movimiento real del gas al caer hacia la superficie estelar.

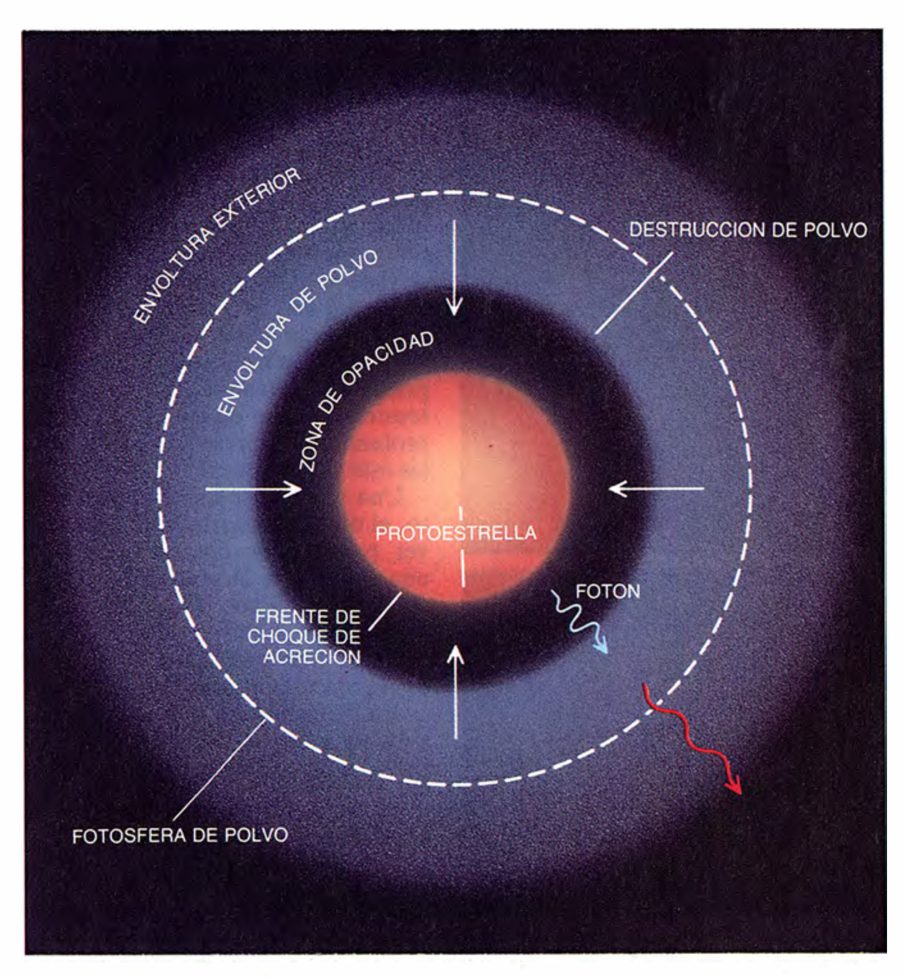
Una vez que la protoestrella ha incorporado la cantidad de materia suficiente para alcanzar unas cuantas décimas de la masa del Sol, la temperatura de su centro llega a un nivel adecuado para inducir la fusión nuclear. Ahora bien, la fusión que se produce en las protoestrellas difiere bastante de la que acontece en las estrellas de la secuencia principal; son éstas las que se hallan en la mitad de su vida, como el Sol, y han conseguido un estado prolongado de equilibrio. La reacción primaria que suministra energía a una estrella madura implica la fusión de núcleos de hidrógeno.

El hidrógeno es el constituyente químico predominante en el universo. La gran explosión lo creó sobre todo en su forma isotópica normal: un átomo cuyo núcleo consta de sólo un protón. Pero aproximadamente dos de cada 100.000 núcleos de hidrógeno aparecen en forma de deuterio, núcleo integrado por un protón y un neutrón. El deuterio persiste en el gas interestelar que se incorpora en las nuevas estrellas.

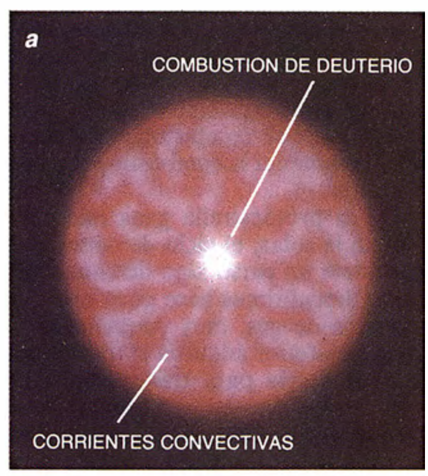
Esa pequeña impureza, conviene resaltarlo, desempeña un papel fundamental en la vida de las protoestrellas, cuyo interior no se ha calentado todavía bastante para posibilitar la fusión del hidrógeno ordinario, reacción ésta que se da en torno a los 10 millones de kelvins. Pero ocurre que, en virtud de la fuerza compresiva de la gravedad, las protoestrellas suben fácilmente al millón de kelvins, temperatura necesaria para iniciar la fusión del deuterio, que, a su vez, libera grandes cantidades de energía. El material protoestelar, demasiado opaco, no puede transmitir esta energía por radiación. En su defecto, la estrella se hace convectivamente inestable: burbujas de gas calentadas por el fuego nuclear ascienden a la superficie.

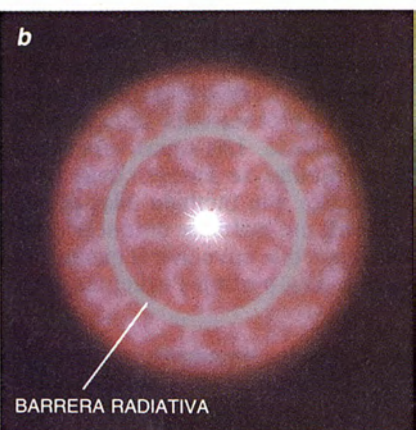
El movimiento ascendente se compensa con el descenso de gas frío hacia el centro. Se trata de la misma clase de circulación convectiva que, a escala mucho menor, se produce en el aire de una habitación calentada por un radiador, si no olvidamos que, en la protoestrella, los bucles de la circulación arrastran hacia abajo deuterio fresco que ha aterrizado en la superficie. Estos átomos de deuterio son transportados rápidamente hacia el centro, donde se fusionan y liberan más calor. De este modo, el retorno del ciclo convectivo aporta continuamente el combustible necesario para mantener la combustión y la convección.

Si la protoestrella gana materia y dobla la solar, el ciclo de convección acomete un curso algo distinto. Palla y yo descubrimos hace poco que cierta capa de gas, muy pequeña, de la región interior adquiría la transparencia necesaria para transportar calor por radiación, en vez de acarrearlo por convección. Ni el gas que sube ni el que baja son capaces de atravesar esa barrera radiativa. Por consiguiente, la fusión consume rápidamente todo el deuterio del interior de la barrera. El deuterio fresco que cae sobre la protoestrella se acumula en su superficie. Las capas superficiales comprimidas se vuelven más calientes, hasta que también ellas prenden el deuterio; quémase entonces éste en una capa que envuelve el exhausto interior. Las burbujas calientes ascien-

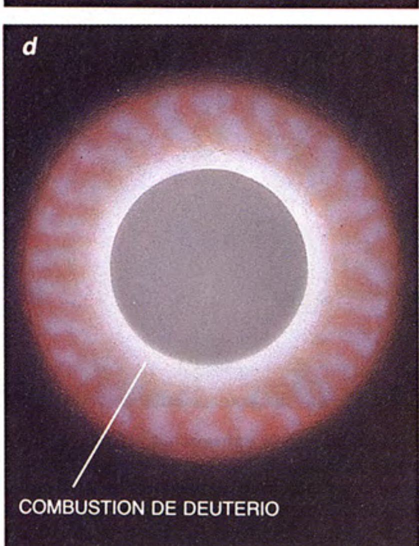


3. UNA PROTOESTRELLA interactúa fuertemente con la materia entrante que la forma, originando distintas zonas. La materia de la envoltura exterior se esparce por la superficie estelar, creando un frente de acreción. Los fotones del frente se alejan de la protoestrella, pasan por el intervalo de opacidad, una región tan caliente que vaporiza los granos de polvo, y, cuando alcanzan la envoltura de polvo, sufren una continua absorción y reemisión por parte de las partículas. Por último, escapan en forma de radiación infrarroja de la fotosfera de polvo.









4. LA FUSION DEL DEUTERIO sucede de manera dependiente de la masa de la protoestrella. En protoestrellas de poca masa, el deuterio alcanza el centro de combustión por circuitos convectivos turbulentos (*a*). Si la protoestrella continúa ganando masa, aparece una barrera radiativa que corta el suministro de deuterio fresco al centro (*b*). La región interior agota rápidamente su deuterio y vuelve a un estado estable sin convección (*c*). Si la protoestrella prosigue acumulando materia, el deuterio se encenderá en una capa gruesa y expandirá la protoestrella (*d*).

den desde esta capa ardiente, llegan a la superficie y bajan de nuevo a ella, lo que completa el ciclo de realimentación.

A pesar de la pequeña concentración de núcleos de deuterio, el calor liberado por su fusión ejerce un efecto notable en la protoestrella. El resultado principal de la quema del deuterio consiste en hinchar la protoestrella. Debido a que la convección distribuye el calor de manera eficaz, la combustión del deuterio infla la protoestrella hasta un tamaño característico, determinado por su masa. Una protoestrella de una masa solar tiene un radio que quintuplica el del Sol. Una protoestrella de tres masas solares, en la que el deuterio queme en una capa subsuperficial, se infla aún más: su radio decuplica el solar.

Un núcleo denso típico encierra una masa mayor que la estrella que terminará por engendrar. Hay, pues, algún mecanismo que expulsa esa masa sobrante y suspende la acreción; para la mayoría, el responsable sería un fuerte viento que surge de la superficie de la protoestrella. El viento relanza el gas entrante y acabará por dispersar todo el núcleo denso.

La idea del viento no brotó de ningún cálculo teórico. Nació de la observación repetida del gas molecular que sale de las fuentes de radiación infrarrojas, flujo cuya causa se atribuiría al viento protoestelar. Este último, que aún no se ha observado directamente, debe extraer materia y energía a una velocidad bastante superior que la de los vientos que emanan de las estrellas de la secuencia principal. La causa del viento protoestelar es uno de los misterios más profundos que presenta el estudio de las estrellas jóvenes.

Una vez se dispersa el núcleo denso, el objeto expuesto, que ya se deja ver por medios ópticos, constituye una estrella de la presecuencia principal. Al igual que las protoestrellas, las estrellas de la presecuencia principal son muy luminosas. Y de nuevo es la gravedad, y no la fusión nuclear, quien da cuenta de su brillo. La presión que existe en el interior de la estrella le evita abocar a un verdadero colapso de caída libre. Sin embargo, el calor que mantiene esta presión se radia desde la superficie estelar, por lo que la estrella brilla mucho y se encoge lentamente.

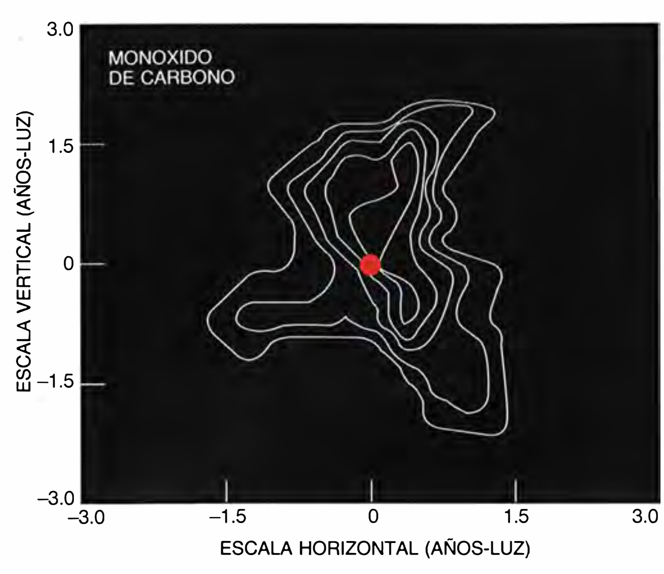
Como las protoestrellas, las estrellas de la presecuencia principal son convectivamente inestables, si bien la física subyacente difiere bastante de unas a otras. En general, la convección empieza en una estrella cuando la temperatura cae muy bruscamente del centro a la superficie. En las protoestrellas, la combustión del deuterio en el centro crea el ciclo de convección. Pero cuando ha entrado en la presecuencia principal, ya ha agotado su reserva de deuterio.

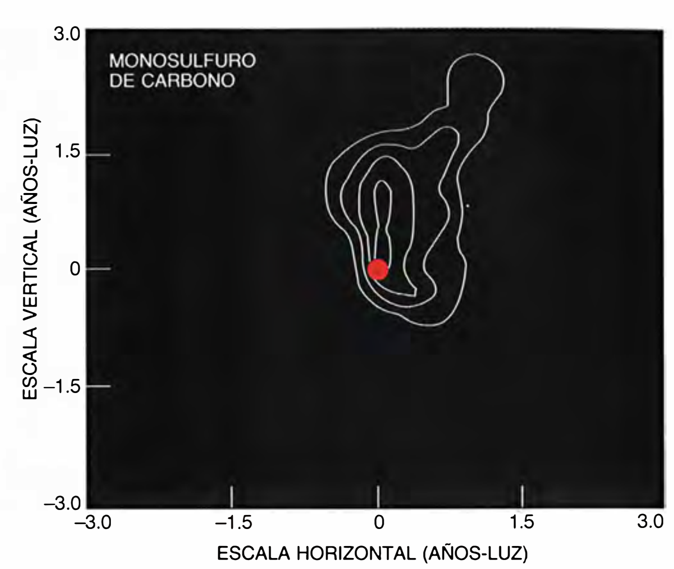
El brillo intenso de las estrellas de la presecuencia principal nos habla de un gradiente brusco de temperaturas en el interior de las mismas. Los altos niveles de energía radiante emitidos enfrían rápidamente las capas externas, mientras que la región interior permanece aislada por la materia que la rodea. Conforme la estrella va envejeciendo y apagándose su luminosidad, decrece también la región de inestabilidad convectiva. En el Sol persisten todavía procesos de convección en el 30 por ciento exterior del radio. Los ciclos de subida y bajada crean la textura granular de la superficie solar.

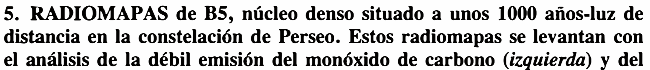
A medida que la estrella se vuelve más compacta, aumenta su temperatura interna, terminando por alcanzar unos 10 millones de grados kelvin, circunstancia en que el hidrógeno ordinario empieza a fusionarse para formar helio. El calor liberado por la fusión provoca la presión que frena la contracción y la estrella penetra en la secuencia principal. El Sol, una estrella típica de combustión de hidrógeno, tardó unos 30 millones de años en contraerse desde su gran radio protoestelar hasta su tamaño actual, que ha mantenido, a lo largo de unos cinco mil millones de años, gracias al calor liberado por la subsiguiente fusión del hidrógeno.

El cuadro expositivo de la evolución estelar que acabo de ofrecer guarda coherencia con las teorías físicas y los procesos nucleares conocidos. Pero la teoría precisa del apoyo de los datos, y éstos los aportan las mediciones de las propiedades de muchas estrellas en distintas fases de su historia. La manera más conveniente de expresarlos consiste en representar gráficamente la evolución de las estrellas visibles en un diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R).

El diagrama H-R relaciona la luminosidad estelar, indicada en el eje de ordenadas, con la temperatura su-





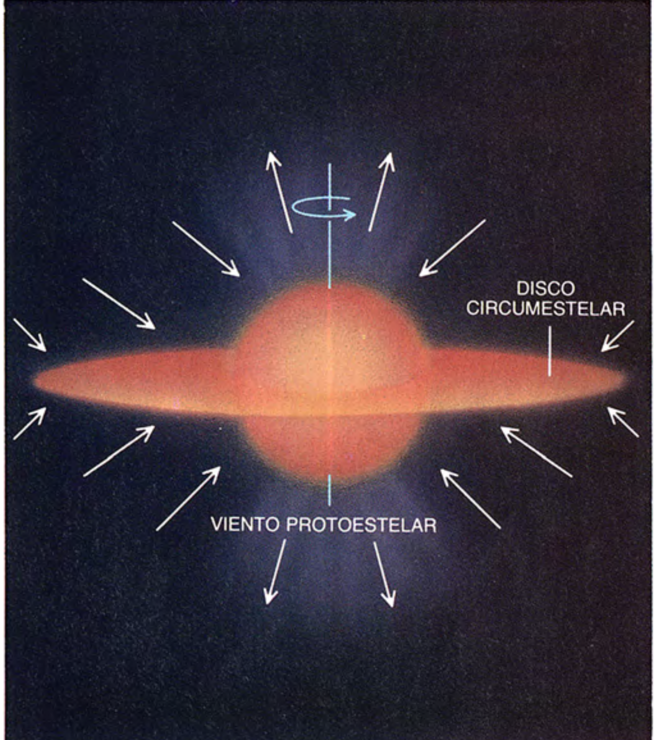


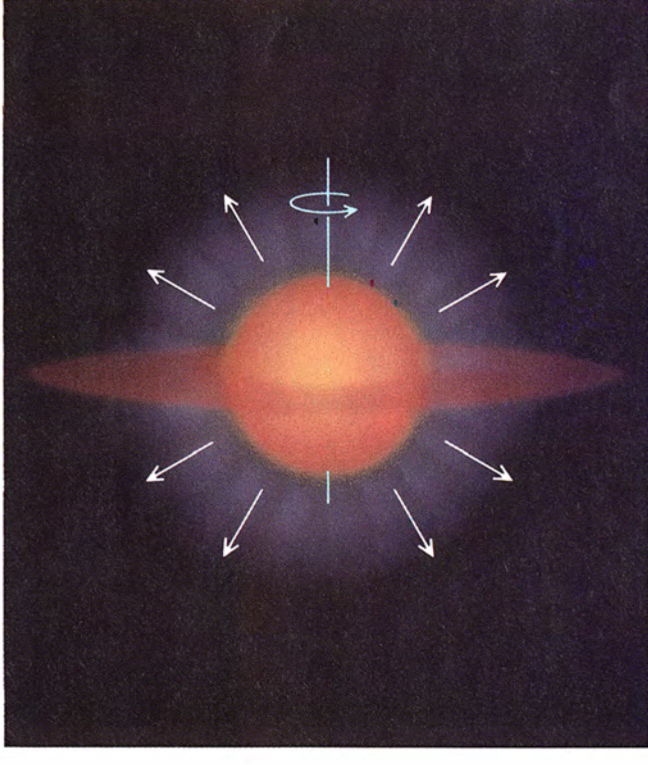
5. RADIOMAPAS de B5, núcleo denso situado a unos 1000 años-luz de distancia en la constelación de Perseo. Estos radiomapas se levantan con el análisis de la débil emisión del monóxido de carbono (*izquierda*) y del monosulfuro de carbono (*derecha*) a longitudes de onda milimétricas. El punto rojo central de cada imagen representa una fuente infrarroja puntual, muy probablemente una protoestrella.

perficial, anotada en el eje de abscisas. Muchas estrellas de la secuencia principal, pensemos en el Sol, donde se produce la fusión del hidrógeno ordinario, caen a lo largo de una diagonal. Los cálculos teóricos indican que la luminosidad y la temperatura superficial de una estrella de combustión de hidrógeno —y por consiguiente su ubicación en esa trayectoria esquemática— dependen de su masa.

Esta teoría concuerda bien con la observación. Los astrónomos determinan la luminosidad de una estrella midiendo su brillo (dando por supuesto que también se conozca su distancia) y deducen la temperatura superficial analizando su espectro. Cuando se miden estas dos cantidades en un cúmulo de estrellas determinado y se representan los datos en el diagrama H-R, la mayoría de las estrellas caen a lo largo de la curva teórica de la secuencia principal.

Puesto que una estrella de la presecuencia principal brilla más que otra de la secuencia principal que tenga la misma masa, habrá de caer por encima de la línea de la secuencia principal en el diagrama H-R. La luminosidad decrece con el tiempo, porque el encogimiento de la estrella recorta el área superficial radiante. En consecuencia, el punto representativo de la estrella irá deslizándose a lo largo de una trayectoria definida,





6. VIENTOS PROTOESTELARES, que, según se cree, se dirigen de manera bipolar a lo largo del eje de rotación (*izquierda*). El viento obliga a retroceder al gas entrante; pero no parece perturbar el disco circumestelar. La estrella termina por hacerse visible como un objeto de la presecuencia principal, con un viento mucho más débil (*derecha*). La causa del viento protoestelar sigue siendo un misterio.

que es la misma para todas las estrellas de su masa. Los astrónomos llaman a tal trayectoria "la vía Hayashi", en honor de Chushiro Hayashi, de la Universidad de Kyoto, quien calculó las propiedades de las estrellas de la presecuencia principal a comienzos de la década de los sesenta.

Las observaciones de cúmulos jóvenes cercanos, es decir, de estrellas separadas por abundante gas molecular, han puesto de manifiesto que, en buen número, caen por encima de la secuencia principal. Las que están cerca de las vías Hayashi correspondientes a una masa solar o menos responden al nombre de estrellas T Tauri. Sus compañeras más masivas constituyen las estrellas Herbig Ae y Be. (Así llamadas en honor de George Herbig, de la Universidad de Hawai, astrónomo iniciador del estudio observacional de las estrellas jóvenes.)

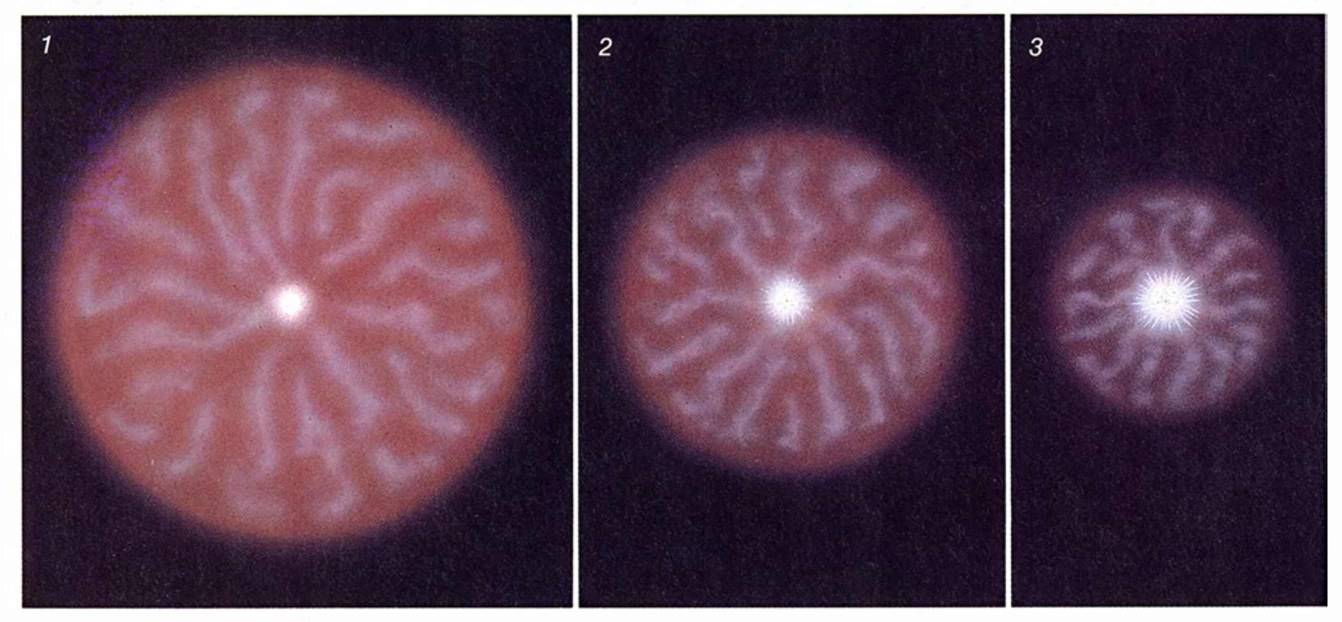
Aunque los teóricos se sienten satisfechos con que muchas estrellas caigan por encima de la secuencia principal, resulta más difícil demostrar que discurran realmente por sus vías Hayashi apropiadas. Recordemos que la combustión de deuterio en las protoestrellas les da un radio definido para cada valor de la masa. En 1983 me valí de esta relación, y del conjunto de vías Hayashi conocidas, para formular la siguiente predicción: una vez las estrellas de la presecuencia principal se hacen visibles ópticamente, todas deben aparecer sobre otra curva del diagrama H-R. Desde esta curva, o línea de nacimiento, cada estrella desciende por su vía Hayashi hasta la secuencia principal.

Las observaciones parecen confirmar la idea de la línea de nacimiento. Las luminosidades medidas y las temperaturas superficiales de las estrellas en todos los cúmulos jóvenes caen en un límite bien definido, o por debajo del mismo, en el diagrama H-R. Límite que, a su vez, coincidía razonablemente con la línea de nacimiento teórica. En 1979, Martin Cohen y Leonard V. Kuhi, de Berkeley, publicaron un estudio sistemático de centenares de estrellas T Tauri. En 1984, Ulrich Finkenzeller, del Landessternwarte auf dem Königstuhle de Heidelberg, y Reinhard Mundt, del Instituto Max Planck de Astronomía, ofrecieron otro semejante sobre las estrellas Herbig Ae y Be, menos frecuentes. Además, las estrellas visibles que están en el centro del flujo saliente de gas molecular caen también en la línea de nacimiento. Su localización en el diagrama confirma la asociación de la fase de flujos salientes con el inicio de la contracción de la presecuencia principal.

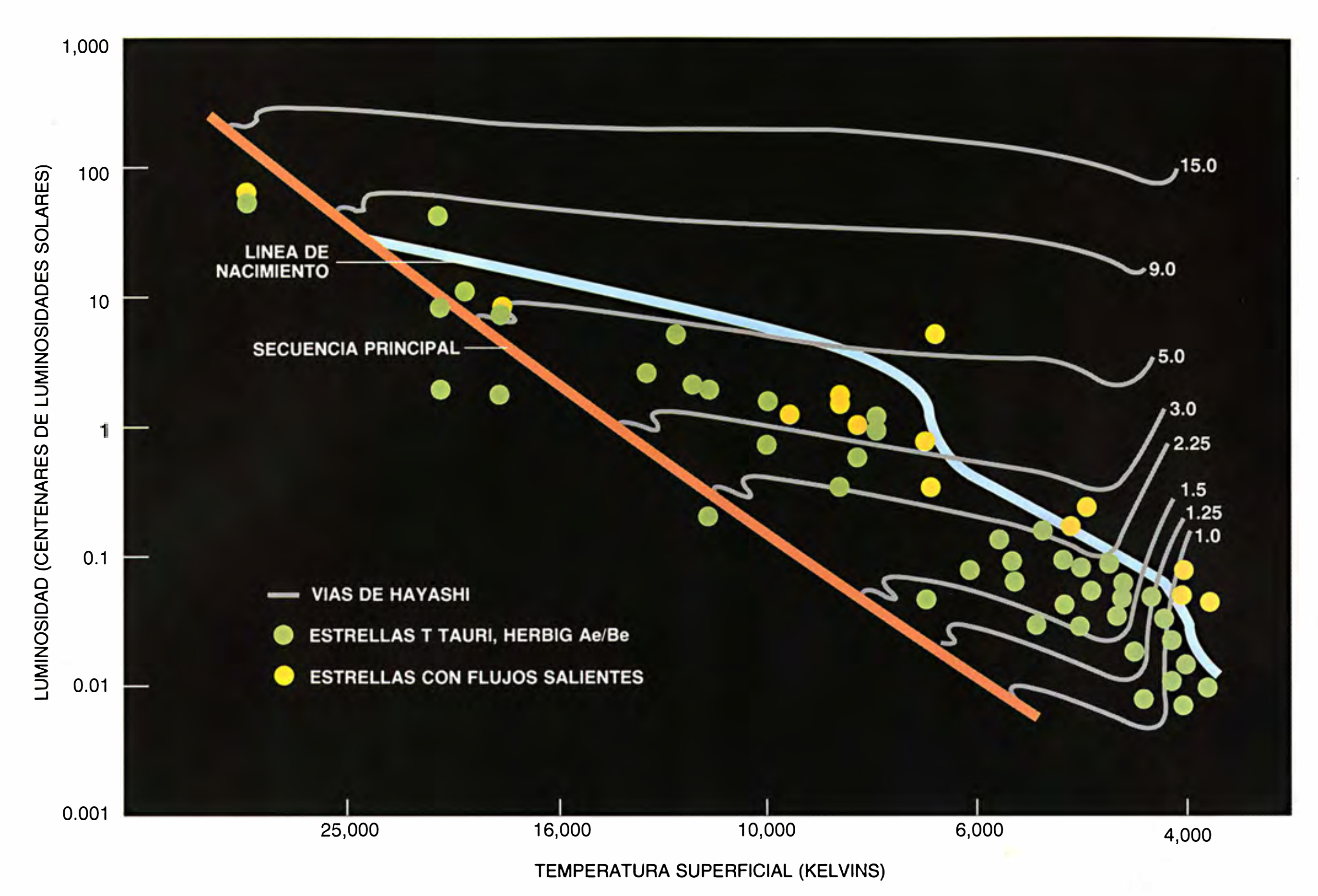
Palla y yo hemos demostrado que la línea de nacimiento debe cruzarse con la secuencia principal en algún punto. Calculamos que las dos curvas han de encontrarse en la posición correspondiente a una masa estelar de ocho masas solares. En términos físicos, el hallazgo significa que cualquier estrella cuya masa supere este valor crítico iniciará la fusión de hidrógeno ordinario mientras su núcleo denso progenitor esté todavía colapsándose en su superficie. Estas estrellas masivas no deberían presentar, por tanto, una fase visible de presecuencia principal. Hasta ahora esta predicción también parece estar de acuerdo con las observaciones realizadas.

A pesar de estos estimulantes éxitos de la teoría, no acabamos de entender muchas propiedades conocidas de las estrellas jóvenes. Por ejemplo, la mayoría de estos cuerpos celestes son variables irregulares: su brillo fluctúa en períodos que van desde horas a meses. El espectro de muchas estrellas T Tauri, el grupo mejor analizado, muestra bastante más radiación infrarroja y ultravioleta que las estrellas de la secuencia principal de masa parecida. Sin embargo, Frederick Walter, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, ha encontrado que otras estrellas T Tauri de masas y edades muy similares apenas presentan exceso de emisión. En fin, hay muchas pruebas de fuertes vientos estelares, remanentes quizá de aquellos otros, mucho más potentes, que, se supone, pusieron fin a la fase protoestelar.

Los modelos que describen el nacimiento de las estrellas presentan un importante resultado adicional: el disco circumestelar. Se cree que tales discos suministran la materia prima para la formación de los sistemas planetarios. Discos que se originan porque no todo el material que se contrae dentro de un núcleo denso se une directamente a la protoestrella. Sea cual sea el proceso que formó el núcleo denso, le imprimió, a buen seguro, cierta rotación al empezar el colapso. Dentro del núcleo en rotación, el gas que posee un momento



7. DEBILITAMIENTO PROGRESIVO de una estrella de la presecuencia principal a medida que, por la acción de su propia gravedad, se va contrayendo. El calor perdido por la superficie provoca convección en el interior y la temperatura central empieza a aumentar. Cuando el centro alcanza unos 10 millones de kelvins, el hidrógeno se fusiona para formar helio. La reacción de fusión libera ingentes cantidades de energía, que detienen la contracción. Al llegar a este punto la estrella ha alcanzado la secuencia principal y arderá durante miles de millones de años.



8. DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL, que representa la luminosidad estelar en función de la temperatura superficial. Las estrellas de la presecuencia principal empiezan en la línea de nacimiento y viajan según distintas trayectorias, llamadas vías Hayashi, antes de alcanzar la secuencia principal. Las posiciones observadas de las estrellas T Tauri y Herbig Ae y Be y de las estrellas con flujos salientes concuerdan con la teoría de la formación estelar: están entre la línea de nacimiento y la secuencia principal y parecen seguir sus vías Hayashi apropiadas. Cada vía de la figura se señala con la correspondiente masa estelar en unidades solares. Las escalas de los ejes son logarítmicas.

angular más alto será el más alejado del eje polar. Conforme la región de colapso se va expandiendo hacia afuera, va atrapando el gas más alejado. Este material empieza a caer hacia dentro, pero no llega a la protoestrella; antes bien, gira a su alrededor y adquiere la forma de disco circumestelar.

Roger Ulrich, de la Universidad de California en Los Angeles, dio en 1976 configuración matemática al desplazamiento gradual de la dirección del gas que cae de la proto estrella al disco. Abundaron en lo mismo, en 1981, Patrick Cassen y Anne Moosman, del centro de investigación Ames de la NASA. Cassen y Moosman investigaron también las propiedades físicas teóricas de los discos: tamaño y densidad superficial. Existe hoy un vivo interés por extender su trabajo a los discos más viejos que rodean las estrellas de la presecuencia principal, por una doble razón: promete desentrañar el proceso de formación de los planetas y las observaciones recientes sugieren la existencia real de los discos.

A propósito de esas observaciones, podríamos citar las imágenes que muestran materia circumestelar alrededor de estrellas jóvenes. En 1987, Steven Beckwith, de la Universidad de Cornell, y Anneila Sargent, del Instituto de Tecnología de California, detectaron una extensa emisión de monóxido de carbono que rodeaba la estrella T Tauri HL Tau. Atribuyeron la emisión de ese gas a un disco de poca masa y un diámetro de varias semanas-luz.

Más indirecta, y por ende controvertida, es otra prueba de la existencia de los discos. Se trata, en realidad, de una inferencia. Afirman los teóricos que la mejor forma de explicar ciertas propiedades observadas de las estrellas T Tauri es mediante la presencia de discos. Siguiendo la sugerencia lanzada en 1974 por Donald Lynden-Bell y James Pringle, de la Universidad de Cambridge, se vienen atribuyendo los excesos en infrarrojos y ultravioletas de estas estrellas a discos luminosos que están transportando continuamente masa hacia sus estrellas huéspedes.

La materia debe perder momento angular si ha de describir una espiral hacia la estrella. Lynden-Bell y Pringle supusieron la existencia de un rozamiento sin especificar en el interior del disco. Si dos anillos de gas adyacentes rozan uno contra el otro, la fricción determinará que el más interno, de giro más rápido, se frene y contraiga, a la manera del satélite en órbita sobre la Tierra que se va degradando con el rozamiento a causa de la resistencia que le opone el medio atmosférico.

Desde esta perspectiva, el exceso de emisión infrarroja representa el calor generado por el rozamiento. Por lo que a la radiación ultravioleta se refiere, se supone que surge de una región estrecha y caliente entre el disco y la estrella, en la que una fuerza de rozamiento, más intensa, frena el gas orbitante. Utilizando modelos de esta clase, Lee W. Hartmann y Scott Kenyon, de Harvard, Gibor Basri, de Berkeley, y Claude Bertout, de la Universidad de París, han ajustado muchas características espectrales de las estrellas T Tauri.

Mas, a pesar de los esfuerzos realizados por los teóricos durante muchos años, no existe una explicación plausible de los rozamientos internos que proponen estos modelos. En ese contexto, los cálculos demuestran que

la viscosidad molecular ordinaria resulta incapaz, por demasiado pequeña, para provocar una espiral de gas apreciable hacia la estrella central.

En mi opinión, esta dificultad para explicar el origen del rozamiento prueba la debilidad del modelo subyacente. Mejor sería abordar el problema abandonando la hipótesis de la fricción interna y concentrar la atención en la estructura de los discos que pueden realmente constituirse durante el colapso de los núcleos densos en rotación. Así lo ha venido haciendo mi grupo a lo largo de los últimos años, y los modelos que hemos obtenido difieren de los que se fundan en el rozamiento.

Todas las observaciones habituales de discos, directas e indirectas, apuntan hacia masas que son una fracción muy pequeña de la masa de la estrella central, unas centésimas o menos. Ven en ello los teóricos un dato preocupante y retador a la vez. Si la acumulación de materia que cae con exceso de rotación forma discos, ¿por qué habría de cesar el proceso al poco de haberse formado la estrella? Si son realmente los vientos protoestelares los que frenan la fase de colapso, ¿indican las pequeñas masas de los discos una relación causal entre su formación y la puesta en marcha de estos flujos energéticos salientes?

No disponemos todavía de respuesta para tales cuestiones. Pero los problemas no resueltos deben contemplarse como eslabones desconocidos de una cadena cuyas anillas principales han sido forjadas en extraordinaria combinación de trabajo experimental y teórico. Podremos descubrir los eslabones que faltan y completar la historia de las estrellas jóvenes si sabemos leer las pistas que nos ofrece la naturaleza, pistas que se elevan sobre nuestra cabeza, parpadeando en el cielo de una noche despejada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STAR FORMATION IN MOLECULAR CLOUDS: OBSERVATION AND THEORY. Frank H. Shu, Fred C. Adams y Susana Lizano en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 25, págs. 23-81; 1987.

IN DARKNESS BORN: THE STORY OF STAR FORMATION. Martin Cohen. Cambridge University Press, 1988.

UNDERSTANDING YOUNG STARS: A HISTORY. Steven W. Stahler en *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 100, n.° 634, págs. 1474-1485; diciembre de 1988.

THE BIRTHLINE FOR INTERMEDIATE-MASS STARS. Francesco Palla y Steven W. Stahler en *Astrophysical Journal*, vol. 360, n.° 2, parte 2, págs. L47-L50; 10 de septiembre de 1990.

Tratamiento del accidente cerebrovascular

Todavía no existe un tratamiento eficaz para paliar las lesiones cerebrales, pero están a la vista muchas opciones prometedoras. Algunas están ya en la fase de ensayos clínicos con seres humanos

Justin A. Zivin y Dennis W. Choi

Llámase accidente cerebrovascular (ACV) la disminución del riego sanguíneo cerebral causada por una lesión circunscrita. Hoy por hoy, los médicos son incapaces de controlar el alcance de esta última, aunque atiendan al paciente en el mismo momento de producirse. Como mucho, podrán tratar las complicaciones clínicas, le mantendrán relativamente cómodo e intentarán evitar las recurrencias. Tan desalentador panorama podría cambiar bien pronto, pues en distintos laboratorios se estudia la manera de limitar la lesión cerebral asociada al ACV. Algunos tratamientos se encuentran ya en la fase de ensayo clínico con seres humanos.

La gravedad y frecuencia de la enfermedad hacen que esta tarea sea importante y urgente. El ACV afecta a lo que nos diferencia como seres humanos, el cerebro, causando la muerte o la incapacidad de una persona aparentemente sana en pocos minutos. Ocupa el tercer lugar entre las principales causas de mortalidad en los países industrializados y el primero entre las causas de incapacidad en personas adultas. De sus víctimas, casi el 30 por ciento mueren y entre un 20 y un 30 por ciento más quedan seria y definitivamente incapacitadas. Algunas pierden por completo la consciencia, otras sufren parálisis, trastornos cognoscitivos, disminución de la coordinación, alteraciones visuales, pérdida de sensibilidad o diversas combinaciones de tales efectos. La terapia física puede ayudar a que muchas de ellas saquen mayor partido de los sistemas indemnes, pero no puede reparar la lesión cerebral propiamente dicha.

Hubo un tiempo en que los neurólogos pensaban que nunca sería posible limitar la destrucción histológica asociada al ACV. Este pesimismo ha ido desapareciendo en los últimos años a la par que aumentaban los conocimientos sobre el funcionamiento normal del cerebro y la forma en que mueren las células cerebrales isquémicas, las privadas de irrigación sanguínea.

El cerebro depende de la sangre para la aportación continua de oxígeno y glucosa. La interrupción del flujo sanguíneo durante unos pocos minutos produce la degeneración de ciertas neuronas muy vulnerables; su prolongación provoca la muerte de todo tipo de células cerebrales de la zona privada de irrigación, incluyendo las estructurales (glía). Transcurridas escasas horas, la lesión hística suele ser ya irreversible.

Parece lógico pensar que las células afectadas mueren como consecuencia directa de la pérdida de energía. Sin embargo, los resultados obtenidos por distintos investigadores desde hace más de quince años, entre ellos Konstantin A. Hossmann, del Instituto Max Planck de Investigaciones Neurológicas de Colonia, y Bo K. Siesjö, de la Universidad de Lund, parecían indicar que entre la aparición de la isquemia y la muerte de las neuronas se desarrollaba un proceso mucho más complicado, cuyos detalles empiezan a conocerse ahora. Se considera probable que sean ciertas reacciones químicas en cascada las responsables de la muerte de algunas neuronas isquémicas; su desencadenamiento se produce cuando la isquemia altera el sistema normal de señales cerebrales.

La esperanza de que determinados fármacos actúen sobre las células cerebrales e impidan el comienzo o interrumpan la progresión de estas cascadas destructivas es lo que justifica básicamente el actual optimismo sobre la posibilidad de encontrar tratamientos eficaces. También se estudia la conveniencia de restaurar rápidamente el flujo sanguíneo en el cerebro isquémico; por ejemplo, eliminando un coágulo de sangre obstructor. La mayoría de los ACV son consecuencia de coágulos, que se forman en el propio lugar de la oclusión o provienen del corazón.

El enfoque de eliminación de coágulos fue el primero que se intentó, aunque los experimentos iniciales, realizados hace unos 20 o 30 años, no auguraban nada bueno. Ni la cirugía ni la administración de enzimas disolventes del coágulo —en aquella época, la estreptoquinasa o la uroquinasa— mejoraban la supervivencia o el estado de los pacientes.

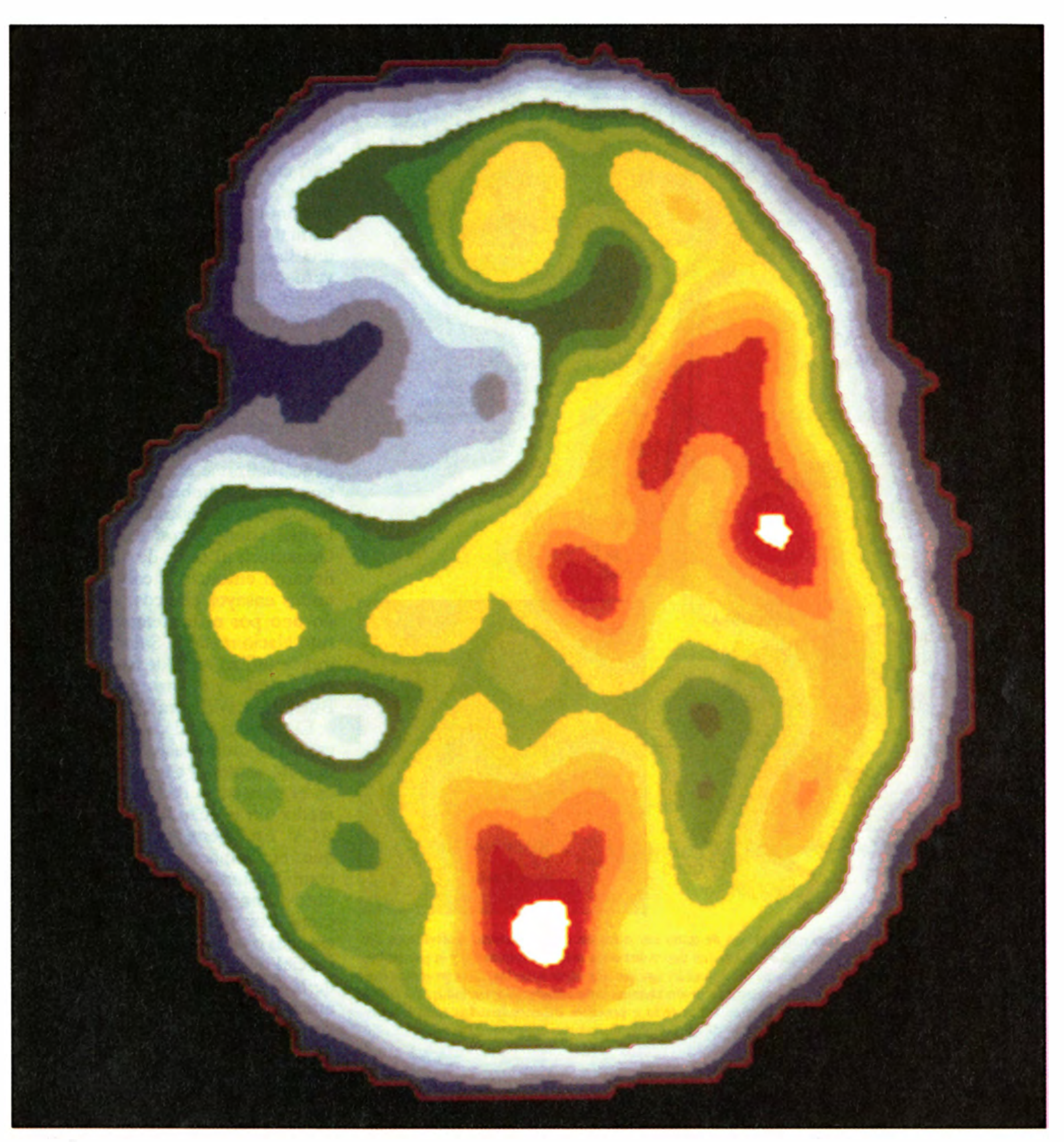
La ausencia de mejora podía derivar, en buena medida, de factores temporales: solían transcurrir más de ocho horas entre la obstrucción y la eliminación del coágulo, intervalo suficiente para que muchas células murieran a causa de la isquemia. Ade-

JUSTIN A. ZIVIN y DENNIS W. CHOI son médicos clínicos e investigadores. Zivin enseña neurología en la facultad de medicina de la Universidad de California en San Diego y tiene consulta en el Hospital de Veteranos de San Diego, tras haber pasado varios años en el departamento de neurología y farmacología del hospital clínico de la Universidad de Massachusetts en Worcester. Choi es profesor y director del departamento de neurología de la facultad de medicina de la Universidad de Washington en San Luis. Ejerce también su profesión médica en el hospital Barnes de la misma ciudad.

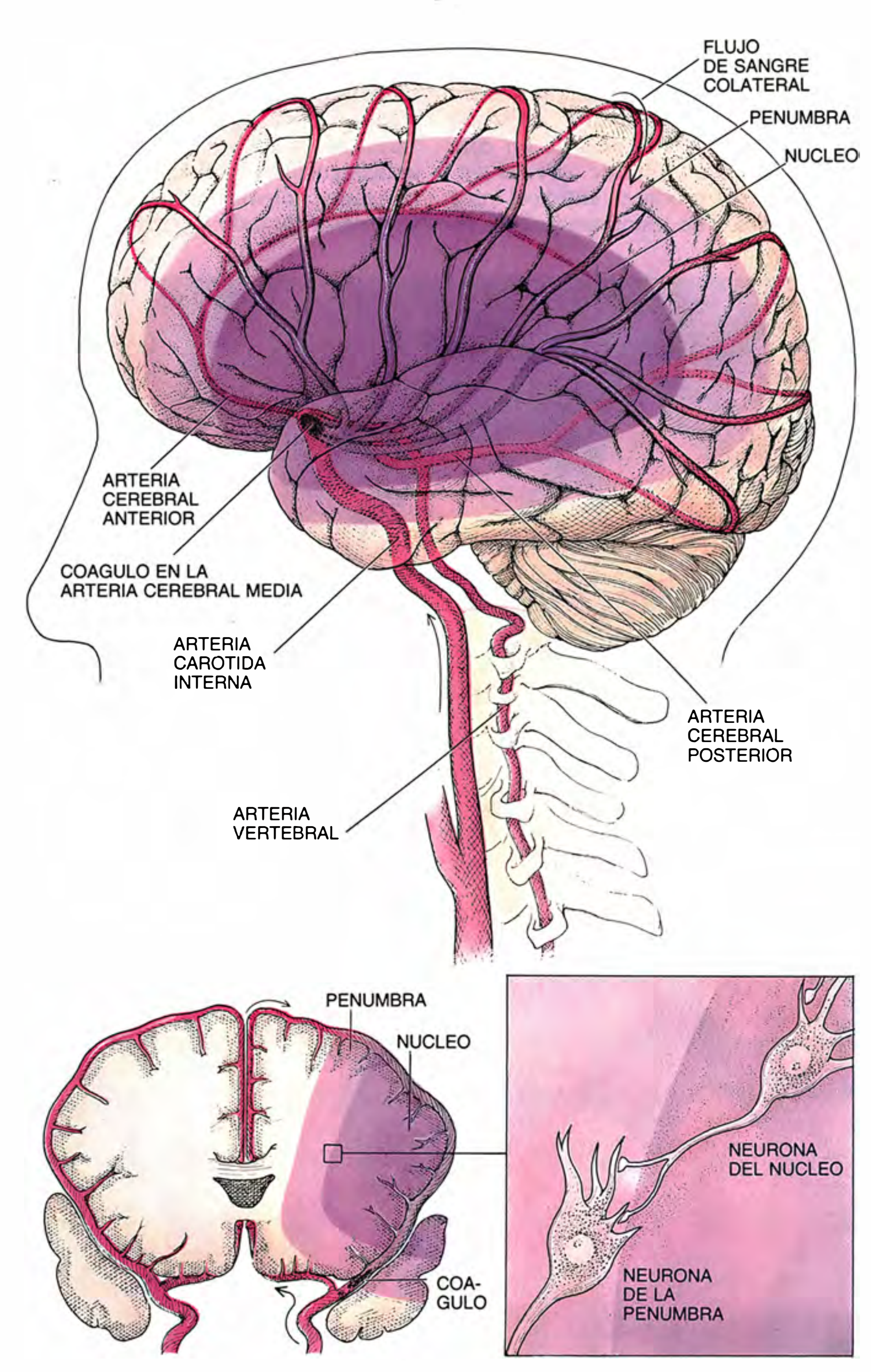
más, tras la restauración retardada del flujo sanguíneo no eran infrecuentes las hemorragias graves. El riesgo de hemorragia aumenta con el tiempo, ya que los vasos sanguíneos de las zonas isquémicas pueden resultar dañados y debilitados. Hoy como ayer, pocas veces puede aplicarse la cirugía con la premura suficiente para que produzca algún beneficio.

Otro factor que pudo contribuir a la pobreza de los resultados fue la incapacidad de diagnosticar la existencia de hemorragias iniciales, lo que hubiese dejado a los pacientes fuera del tratamiento. Algunos ACV no obedecen a la presencia de un coágulo, sino a la rotura de un vaso sanguíneo; se produce entonces una combinación de lesión mecánica e isquémica. En estos casos, un tratamiento dirigido a la eliminación del coágulo no sólo no mejoraría la lesión causada por la hemorragia sino que, dada la permanencia activa de la estreptoquinasa y la uroquinasa durante varias horas en la sangre, sus efectos anticoagulantes podrían inducir hemorragias adicionales.

A pesar de todo y por fortuna, es-



1. CEREBRO DE UN PACIENTE DE ACV según una imagen tomográfica. Esta sección transversal muestra la deficiente irrigación sanguínea (isquemia) responsable de las lesiones cerebrales. La parte frontal del cerebro se corresponde con la zona superior de la fotografía; el hemisferio izquierdo queda a la izquierda. El flujo de sangre es menor en la región frontal izquierda lesionada, donde predominan los tonos grises y azulados. El flujo moderado del resto del hemisferio (zonas verdosas) está por debajo de lo normal, pero el tejido sobrevive. El hemisferio derecho recibe una irrigación normal. Si se hubiera dispuesto de tratamientos adecuados, la zona de destrucción hística hubiera sido más pequeña.



2. EL TEJIDO CEREBRAL que corre riesgo de daño por oclusión de una arteria se divide en dos regiones: el núcleo (al que pertenecen las células que dependen de la arteria bloqueada) y la penumbra (que abarca células adyacentes receptoras de alguna irrigación por otras arterias). Los procesos destructivos que afectan a las células del núcleo son probablemente abrumadores y variados. La lesión de las células de la penumbra parece deberse sobre todo a procesos desencadenados cuando la isquemia induce la secreción, por las neuronas, de glutamato, un neurotransmisor activador.

tos primeros resultados tan poco alentadores no acabaron con la investigación tendente a la eliminación del coágulo. Otro compuesto actual, el activador plasminógeno tisular (APT), consolida la esperanza. Se trata de una sustancia producida naturalmente por el organismo y sintetizada también en el laboratorio, cuya función consiste en destruir los coágulos sanguíneos cuando ya no son necesarios, al empezar la curación de las heridas.

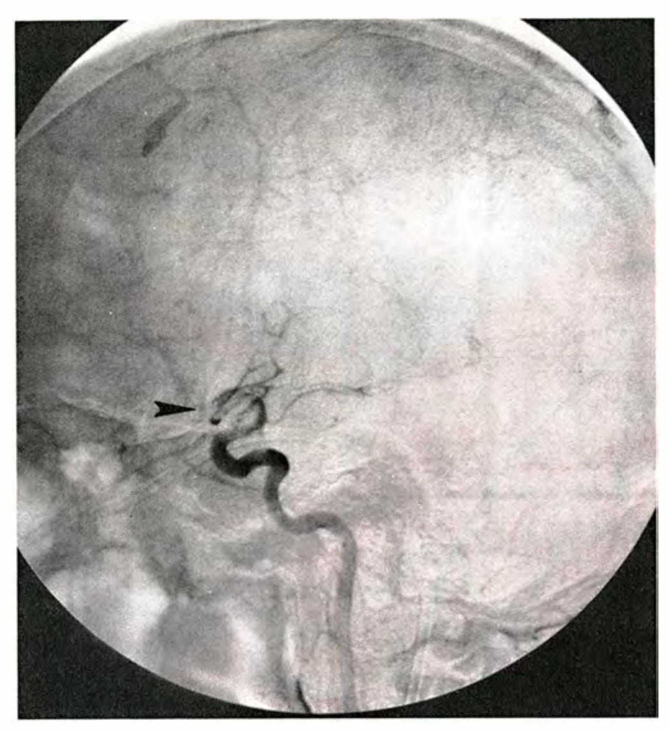
Hace unos diez años, el grupo de Désiré Collen, de la Universidad de Lovaina, descubrió la manera de sintetizar APT en las cantidades necesarias para iniciar estudios de utilidad terapeútica. Se comprobó que su permanencia activa en el torrente sanguíneo duraba unos diez minutos, por lo que su posibilidad de inducir hemorragias debería ser menor que las de la estreptoquinasa o la uroquinasa, lo que le haría más seguro para las víctimas de un ACV.

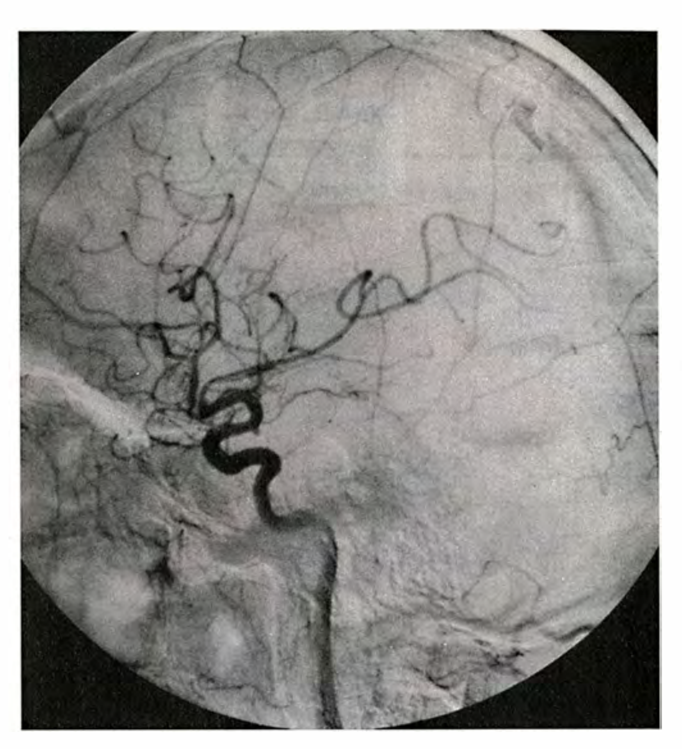
Investigadores de diferentes instituciones hallaron que la administración rápida de APT disolvía las obstrucciones de las arterias cerebrales en animales. Uno de los autores (Zivin) confirmó esos datos y demostró que el APT limitaba el daño tisular y disminuía las pérdidas funcionales en animales tratados antes de transcurrir una hora del comienzo del ACV. La verdad es que animales que hubiesen muerto sin remedio sobrevivían e incluso volvían casi a la normalidad después del tratamiento. Su equipo demostró también que la administración de APT no aumentaba el riesgo de hemorragia cerebral.

Por supuesto, la prueba definitiva de los efectos de cualquier fármaco debe realizarse en humanos. Los ensayos clínicos hubieron de esperar a la producción industrial del compuesto, lo que consiguieron los laboratorios Genentech al cabo de siete años. Se llevaron entonces a cabo dos importantes ensayos clínicos, subvencionado uno por el norteamericano Instituto Nacional de la Salud (NIH), en el que se utilizó APT de los laboratorios Genentech, y el otro por la empresa Burroughs Wellcome.

El número total de enfermos abarcado por ambos estudios fue de más de 170, sometidos a tratamiento bien en el transcurso de la primera hora y media o tras ocho horas del inicio del ACV. En ambos grupos se comprobó que el fármaco rara vez producía complicaciones graves. También se obtuvieron algunas pruebas de su eficacia. Por ejemplo, el equipo de Burroughs observó la eliminación total o parcial de la oclusión cerebral dentro de la primera hora siguiente al tratamiento en cerca de un tercio de los pacientes. Diversos hospitales participan en un segundo ensayo dirigido por el NIH, destinado a evaluar directamente la capacidad del fármaco para mejorar el estado de los pacientes de ACV, cuyos resultados se espera conocer a principios de 1994 o algo antes.

Se dedica también un intenso esfuerzo investigador a la cuestión de





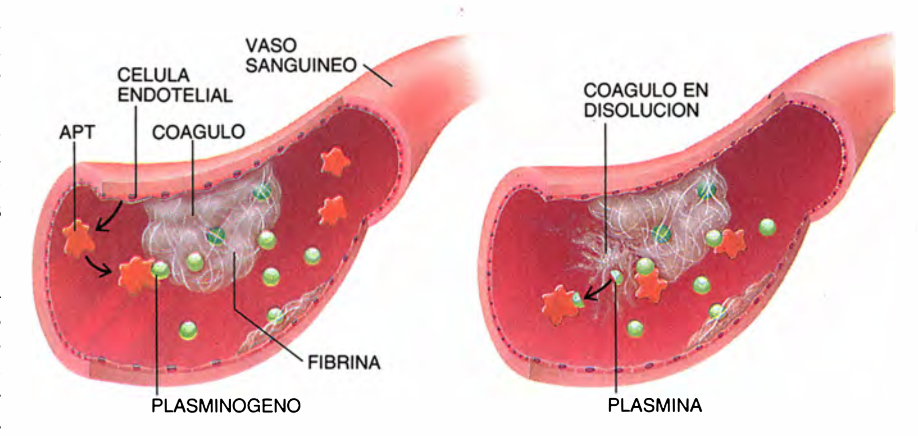
3. OBSTRUCCION de la arteria cerebral media (*flecha de la izquierda*), un vaso que irriga los lóbulos frontal, temporal y parietal, eliminada en un paciente mediante un compuesto llamado activador plasminógeno tisular (*APT, a la derecha*). La capacidad motora de la persona mejoró rápidamente. Esta u otra forma de eliminación inmediata de las oclusiones es la única manera de salvar las células del núcleo.

cómo cortar la serie de reacciones químicas que producen la isquemia cerebral. Ciertos tratamientos experimentales buscan bloquear lo que podríamos llamar la cascada de glutamato, una secuencia de fenómenos que, en nuestra opinión y en la de otros muchos, constituye una causa fundamental de la muerte neuronal por isquemia. Las células situadas en el centro del ACV —la llamada región "nuclear", que queda sin irrigación cuando se ocluye el vaso— mueren por diversas razones determinantes y es probable que ningún tratamiento que no sea la eliminación inmediata del coágulo pueda salvarlas. Por el contrario, la cascada de glutamato bien pudiera ser la causa básica de la lesión que sufre la zona circundante, la "penumbra", receptora de cierta irrigación de otros vasos sin ocluir.

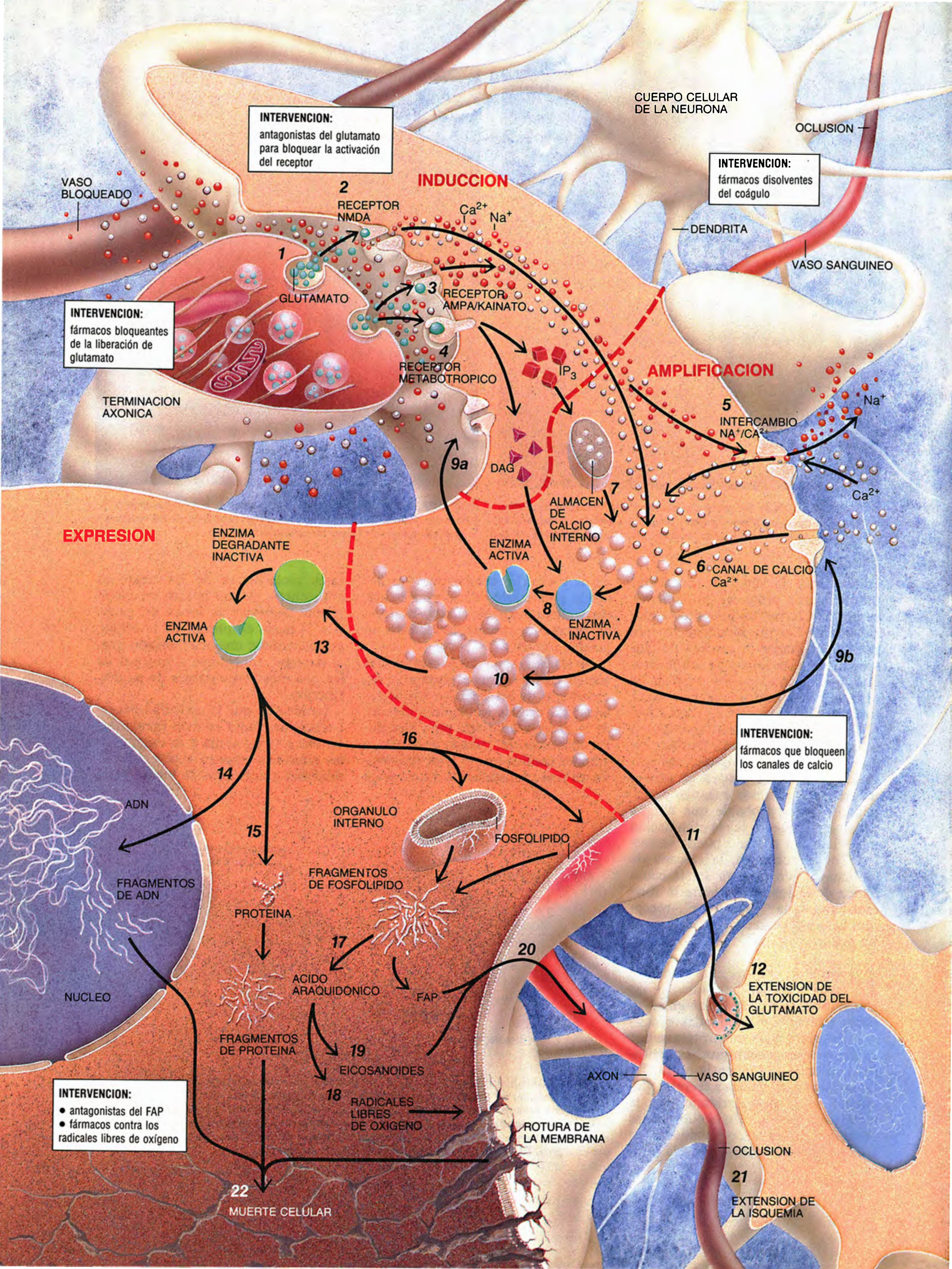
El proceso de cascada comienza cuando las terminaciones de las neuronas isquémicas liberan en el espacio intercelular cantidades excesivas de glutamato, neurotransmisor excitador que poseen muchas neuronas cerebrales, la mayoría quizá. Lo que induce a las células a secretar glutamato es la despolarización de la membrana externa. En circunstancias normales, bombas consumidoras de energía fuerzan a los iones hacia el interior y exterior celular para mantener la polarización de la membrana, pero, como es lógico, cuando la célula no dispone de energía, las bombas no pueden funcionar.

En el tejido sano, las neuronas y las células gliales retiran el glutamato excedentario de los espacios extracelulares; las células isquémicas carecen de la energía necesaria para hacerlo. En consecuencia, cuando se libera en grandes cantidades, el neurotransmisor se une profusamente a los receptores moleculares de las neuronas adyacentes, lo que induce un movimiento anormal de iones de calcio (Ca^{2+}) hacia el interior de la célula, produciéndose una acumulación que, al parecer, contribuye a muchos de los procesos responsables de su destrucción.

La idea de que la actividad neurotransmisora fuera eslabón fundamental entre la isquemia y la muerte de las neuronas empezó a obtener credibilidad a principios de los ochenta,



4. EL APT DISUELVE LOS COAGULOS DE SANGRE activando la enzima plasmina. Cuando se forma un coágulo, un precursor de la plasmina, el plasminógeno, queda atrapado en la trama de fibrina que constituye la estructura del primero (*izquierda*). El APT, que se sintetiza de forma normal en las células endoteliales, escinde el plasminógeno de la superficie (*derecha*), liberando con ello plasmina activa. La plasmina, a su vez, empieza a degradar la fibrina y, por tanto, la expone a más plasminógeno. El proceso continúa hasta que el coágulo desaparece.



INTERVENCION:
antagonistas del glutamato para bloquear la activación del receptor
CUERPO CELULAR DE LA NEURONA
OCLUSION
INTERVENCION:
fármacos disolventes del coágulo
VASO BLOQUEADO
2
RECEPTOR NMDA
INDUCCION
Ca^{2+}
Na^{+}
DENDRITA
VASO SANGUINEO
1
GLUTAMATO
3
RECEPTOR AMPA/KAINATO
INTERVENCION:
fármacos bloqueantes de la liberación de glutamato
4
RECEPTOR METABOTROPICO
IP_3
AMPLIFICACION
TERMINACION AXONICA
5
INTERCAMBIO NA^{+}/CA^{2+}
Na^{+}
9a
DAG
7
ALMACEN DE CALCIO INTERNO
Ca^{2+}
EXPRESION
ENZIMA DEGRADANTE INACTIVA
ENZIMA ACTIVA
6
CANAL DE CALCIO Ca^{2+}
8
ENZIMA INACTIVA
ENZIMA ACTIVA
13
9b
10
INTERVENCION:
fármacos que bloqueen los canales de calcio
16
14
ADN
ORGANULO INTERNO
15
FOSFOLIPIDO
11
FRAGMENTOS DE ADN
FRAGMENTOS DE FOSFOLIPIDO
PROTEINA
17
20
12
EXTENSION DE LA TOXICIDAD DEL GLUTAMATO
ACIDO ARAQUIDONICO
NUCLEO
FAP
FRAGMENTOS DE PROTEINA
19
EICOSANOIDES
AXON
VASO SANGUINEO
18
INTERVENCION:
• antagonistas del FAP
• fármacos contra los radicales libres de oxígeno
RADICALES LIBRES DE OXIGENO
ROTURA DE LA MEMBRANA
OCLUSION
21
22
MUERTE CELULAR
EXTENSION DE LA ISQUEMIA

Fases del ACV

La liberación excesiva de glutamato pudiera lesionar el tejido cerebral por un proceso de tres fases. Se están considerando diferentes estrategias para inhibirlo en cada una de ellas (*recuadros*).

ESTADIO 1: INDUCCION
Cuando se ocluye un vaso sanguíneo (*vasos oscuros a derecha e izquierda*), las neuronas (*así la célula cuya terminación axónica se muestra arriba a la izquierda*) se ven privadas de irrigación y, por tanto, de glucosa y oxígeno. En tales circunstancias liberan glutamato en exceso (***1***), que activa los receptores de glutamato de otras neuronas (*como la que aparece en sección*). En respuesta al glutamato, los receptores NMDA (*arriba en el centro*) abren canales que permiten el paso de sodio (Na^+) y calcio (Ca^{+2}) (***2***) y los receptores AMPA/kainato abren canales de Na^+ (***3***), lo que origina una acumulación anormal de ambos iones. Los receptores metabotrópicos estimulan la síntesis de 1,4,5-trifosfato de inositol (IP_3) y de diacilglicerol (DAG)(***4***).

ESTADIO 2: AMPLIFICACION
El exceso de Na^+ activa un transportador que intercambia Na^+ por Ca^{2+} (***5***). Las cargas positivas internas son voltajes que abren canales de calcio (***6***); el IP_3 libera calcio de los almacenes intracelulares (***7***). El resultado es una sobrecarga de Ca^{2+} que, combinada con el exceso de DAG, activa ciertas enzimas (***8***) que aumentan la sensibilidad celular al glutamato y a otros estímulos (***9a***) e incrementan los canales de Ca^{2+} (***9b***). La sobrecarga de Ca^{2+} (***10***) libera glutamato (***11***), propagando la cascada tóxica a otras células (***12***).

ESTADIO 3: EXPRESION
El Ca^{2+} activa enzimas (***13***) que degradan el ADN (***14***), las proteínas (***15***) y los fosfolípidos (***16***). La degradación de los fosfolípidos genera ácido araquidónico (***17***) que, una vez metabolizado, origina radicales libres de oxígeno (***18***) y moléculas de eicosanoides (***19***). Los radicales libres dañan las membranas celulares; los eicosanoides, junto al factor activador de las plaquetas (FAP), otro metabolito intermediario de la degradación de los fosfolípidos, ocluyen vasos antes indemnes (***20***) y extienden la isquemia (***21***). La destrucción continua de los elementos de la célula mata las neuronas (***22***).

cuando Ira S. Kass y Peter Lipton, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y Steven M. Rothman, de la Universidad de Washington en San Luis, llevaron a cabo ciertos experimentos pioneros con neuronas del hipocampo, región del cerebro particularmente vulnerable a la hipoxia (privación de oxígeno).

Sabiendo que el magnesio debilita la capacidad de las neuronas para liberar neurotransmisores, Kass y Lipton, que usaban tejido cerebral *in vitro*, y Rothman, que recurría al cultivo celular, añadieron magnesio extra a las soluciones de baño, tras lo cual redujeron el aporte de oxígeno. Con magnesio remitía el alcance de la magnitud de las lesiones esperadas, de lo que se deducía que la inhibición de la liberación de transmisores podía proteger a las neuronas de la hipoxia y, en consecuencia, que algún neurotransmisor interviniera en la lesión de las células cerebrales privadas de oxígeno durante el accidente cerebrovascular.

La cuestión era determinar qué neurotransmisor. Resultados convergentes de distintos estudios apuntaban hacia el glutamato. El trabajo de John W. Olney y su equipo, de la Universidad de Washington, durante los años setenta estableció que una exposición excesiva al glutamato o a sus derivados podía producir la muerte de neuronas cerebrales, tal vez a causa de una sobrecarga de estímulo. Olney denominó a este proceso excitotoxicidad.

Poco después, Helene Benveniste, Nils H. Diemer y otros, de la Universidad de Copenhague, demostraron que, cuando el tejido cerebral se volvía isquémico, aumentaba el nivel de glutamato en el exterior de las células afectadas. Casi al mismo tiempo, Rothman, que estudiaba neuronas del hipocampo en cultivos celulares, y Roger P. Simon, Brian S. Meldrum y otros, del Instituto de Psiquiatría de Londres, sobre células del hipocampo de ratas, demostraron que los antagonistas del glutamato (sustancias que bloquean la activación de sus receptores) limitaban la pérdida de neuronas hipóxicas.

Estos trabajos no sólo reforzaban el papel principal del glutamato, sino que planteaban la pregunta clave de cómo ejerce el neurotransmisor sus efectos tóxicos. El glutamato excita a las neuronas estimulando diversos tipos de receptores propios. Sin embargo, la sustancia antagonista con la que experimentó el equipo de Simon, el 2-amino-7-fosfonoheptanoato (recién desarrollada entonces por Jeff C. Watkins y sus colaboradores de la Universidad de Bristol), era muy específica: bloqueaba sólo un tipo de receptor, el llamado *N*-metil-D-aspartato (NMDA). ¿Por qué un bloqueo tan específico protegía eficazmente a las neuronas?

Los estudios realizados por uno de nosotros (Choi) trajeron una posible respuesta: la activación de los receptores NMDA podría ser necesaria para la destrucción de las células. La atribución de tan crucial papel casaría con la observación de que la muerte de neuronas del córtex cerebral en cultivo, inducida por el glutamato, podía reducirse retirando calcio del líquido de cultivo extracelular, lo que hacía pensar que la entrada de calcio en la célula era un mediador decisivo del efecto destructivo del glutamato. Tales resultados coincidían con otros anteriores, obtenidos por Amy MacDermott y sus colaboradores en el NIH, según los cuales los receptores NMDA son los únicos capaces de abrir los canales que permiten la entrada de grandes cantidades de calcio en las neuronas a través de la membrana celular.

Está pendiente todavía la descripción completa de los pasos que median entre la sobreexposición al glutamato y la muerte de las neuronas, pasando por la acumulación de calcio. Pero trabajos realizados en distintos laboratorios nos permiten delinear una secuencia hipotética de tres fases o estadios básicos, en cada uno de los cuales se podría intervenir.

El primer estadio, el de inducción, está formado por la sobreestimulación inicial de los receptores de glutamato y los efectos intracelulares inmediatos. La unión del glutamato a los receptores NMDA abre los canales del calcio, con la consiguiente entrada masiva del ion en la célula. Al mismo tiempo, los iones de sodio (Na^+) fluyen hacia dentro a través de canales controlados por el receptor NMDA y por otros canales gobernados por un tipo distinto de receptor de glutamato, el llamado AMPA/kainato. Al entrar el sodio, le siguen el agua y los iones cloro (Cl^-), de manera que la célula se hincha. El exceso de sodio y calcio también altera, de forma todavía reversible, la respuesta normal de las células nerviosas a señales procedentes de sus congéneres.

Mientras tanto, se activa un tercer tipo de receptor de glutamato, el llamado metabotrópico, que no gobierna canales iónicos, pero induce un

aumento en la producción de dos mensajeros intracelulares, el diacilglicerol (DAG) y el inositol 1,4,5-trifosfato (IP_3), sustancias que podrían ser importantes en el siguiente estadio, el de amplificación.

En esta fase, los niveles de calcio se disparan, en parte porque el IP_3 libera el calcio de sus almacenes intracelulares, pero también porque penetran todavía más iones desde el exterior a lo largo de canales de calcio gobernados por voltaje —que se abren por la alterada distribución de cargas a través de la membrana celular—, así como gracias a una molécula transportadora que intercambia sodio por calcio.

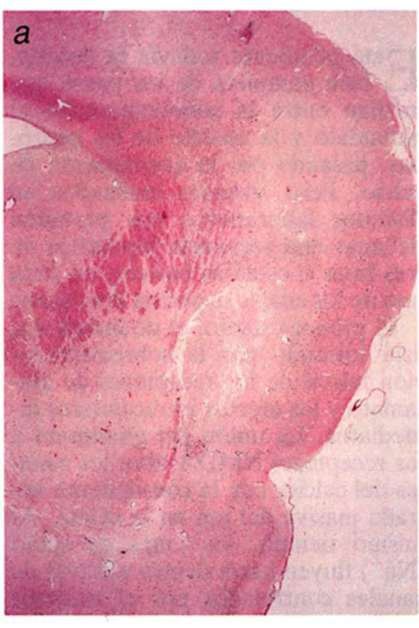
Es probable que esta sobrecarga de calcio, combinada con los elevados niveles del mensajero DAG, altere la actividad de diversas familias de enzimas que modifican las proteínas de la membrana (receptores de glutamato incluidos, con toda probabilidad), aumentando la sensibilidad de las neuronas a las señales de estímulo. Esta excitabilidad incrementada podría causar mayor acumulación de calcio y elevar la liberación de glutamato por las terminaciones de las neuronas. Por tanto, los fenómenos que tienen lugar en esta fase no sólo multiplican dicha acumulación: colaboran a empeorar la excitotoxicidad de las neuronas adyacentes.

En última instancia, el segundo estadio deja paso a la fase de expresión; durante la misma se producen lesiones irreversibles. En sus inicios, el calcio activa enzimas que atacan distintos tipos de moléculas, entre ellas los ácidos nucleicos, las proteínas y los lípidos (grasas). La degradación de los fosfolípidos de la membrana celular externa y de las membranas de orgánulos intracelulares pueden resultar especialmente devastadoras.

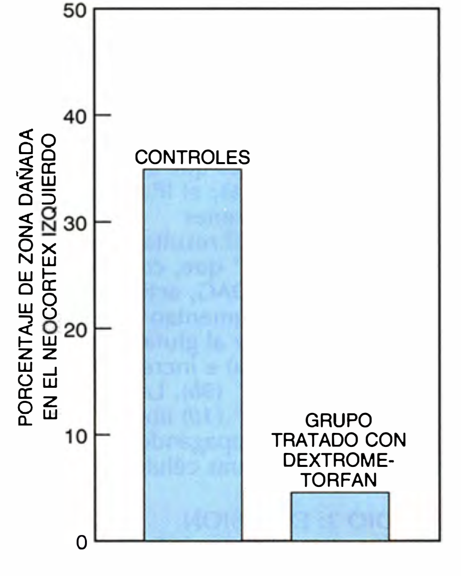
Uno de los subproductos de la degradación fosfolipídica es el ácido araquidónico, cuyo metabolismo genera compuestos muy reactivos llamados radicales libres de oxígeno, los cuales, a su vez, pueden iniciar la peroxidación lipídica, una reacción en cadena capaz de destruir la membrana celular.

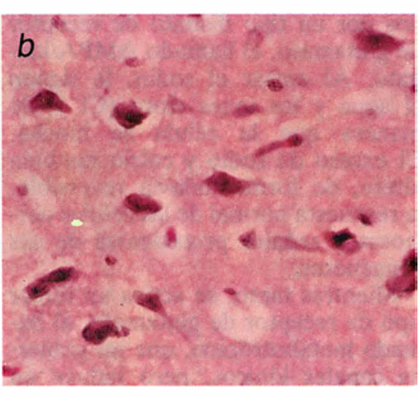
El ácido araquidónico puede producir daños celulares adicionales vía otros mecanismos. Participa en la formación de los eicosanoides, sustancias que aumentan la agregación de células de la sangre y la constricción de los vasos sanguíneos; agravado, quizá, todo ello por la síntesis del factor activador de las plaquetas, otra consecuencia de la degradación de los fosfolípidos. Se entraría así en un círculo vicioso por el que la propia lesión isquémica generaría mayor isquemia.

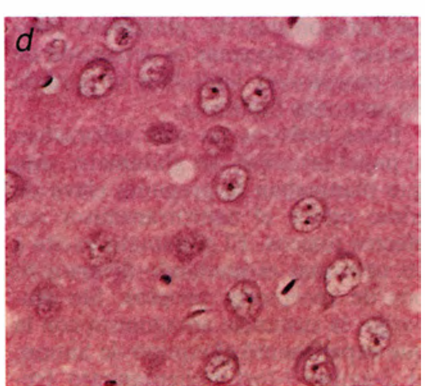
Debería poderse limitar la lesión cerebral inducida por el ACV bloqueando alguno de los pasos de la cascada del glutamato. En sus inicios, habría de reducirse su producción o, al menos en teoría, retirar del espacio extracelular el exceso de neurotransmisor. Un enfoque prometedor es la administración de fármacos que estimulen los receptores de adenosina presentes en las terminaciones de las neuronas, ya que esto inhibe la liberación de la mayoría de neurotransmisores, glutamato incluido.











5. TEJIDO CEREBRAL de un conejo no sometido a tratamiento; aparece muy lesionado por un ACV inducido experimentalmente (*a* y *b*). El de otro que recibió tratamiento previo con dextrometorfan, un antagonista del glutamato relacionado con el dextrorfan, lo está mucho menos (*c* y *d*). Las lesiones del primer animal, amplias zonas de tejido más pálido (*a*) y disminución del tamaño de las neuronas (*manchas obscuras en b*), pueden verse gracias a la microscopía de alta resolución. Otros estudios han demostrado que la administración de dextrometorfan una hora después del comienzo del ACV limita también las lesiones cerebrales de los conejos (*gráfica*). Los datos y las microfotografías son de Gary K. Steinberg, de la Universidad de Stanford.

Cabría también menguar la producción de glutamato oponiéndose a la síntesis de sus moléculas, que normalmente se almacenan en las terminaciones. Raymond A. Swanson y otros, de la Universidad de California en San Francisco, han descubierto que la inhibición de la síntesis con sulfoximina de metionina reduce las lesiones isquémicas en cerebros de ratas. Una tercera estrategia es reducir la temperatura del cerebro; hay datos experimentales de que esta maniobra disminuye las lesiones isquémicas cerebrales, y Myron D. Ginsberg y otros, de la Universidad de Miami, acaban de establecer su relación con el bloqueo de la liberación de glutamato.

Pero la manera más fácil de cortar la secuencia podría ser la administración de antagonistas del glutamato que eviten la activación de los receptores NMDA. Las compañías farmacéuticas ya han desarrollado compuestos que tienen este efecto, así el CGS 19755 (Ciba-Geigy), el MK-801 (Merck) y el dextrorfano (Hoffman-La Roche). Todos ellos reducen las lesiones producidas por el ACV en animales; la actividad y riesgos del CGS 19755 y del dextrorfano en seres humanos se encuentran en fase de evaluación. La aplicación conjunta de antagonistas del glutamato que impidan la activación de los receptores AMPA/kainato podría aumentar los beneficios del bloqueo de los receptores NMDA.

El desarrollo reciente de este último grupo de fármacos podría tener especial importancia para las víctimas de la llamada isquemia cerebral global, que se produce, por ejemplo, en pacientes afectados de hemorragias profusas o cuando el corazón deja temporalmente de bombear sangre durante un paro cardiaco. Los antagonistas que actúan sobre los receptores NMDA tienen escaso poder para reducir las lesiones hísticas de animales con isquemia global, mientras que un nuevo antagonista del receptor AMPA/kainato, designado NBQX, puede mejorarlas notablemente en las ratas, según afirman Malcolm J. Sheardown y otros, de la compañía danesa A/S Ferrosan en Soeborg.

Las razones por las que los bloqueantes del receptor NMDA son menos efectivos en la isquemia global que en la local podrían relacionarse con la mayor acidez que presentan los líquidos extracelulares en el primer caso. Cuando falla el aporte de sangre a todo el cerebro, la acidez de estos líquidos aumenta más de lo que lo hace en la zona de penumbra de quienes padecen una isquemia local. Martin Morad y otros, de la Universidad de Pensilvania, han demostrado que el aumento de acidez disminuye la actividad mediada por el receptor NMDA, pero tiene un efecto menor sobre las actividades perjudiciales de los otros receptores de glutamato, tarea para la que sería necesario desarrollar nuevos fármacos.

No se ha dejado de lado la fase de amplificación. En este estadio, las sustancias químicas del tipo de la dihidropiridina, como la nimodipina, resultan teóricamente atractivas por su doble efecto: disminuyen la entrada de calcio a través de los canales controlados por voltaje y dilatan los vasos sanguíneos, lo que podría mejorar el aporte de sangre a la zona de penumbra. Los ensayos clínicos en los que se han administrado exclusivamente dihidropiridinas han tenido resultados variables, pero podrían proporcionar beneficios adicionales si se recetaran junto con los antagonistas del glutamato.

También se ha investigado la proteína C kinasa, una de las enzimas que podrían participar en la amplificación, aunque, por el momento, los resultados obtenidos son poco concluyentes. Por una parte, Erminio Costa y otros, del Instituto Fidia-Georgetown de Neurociencias, en Washington D.C., han observado que los compuestos gangliósidos, que se supone inhiben la acción enzimática, pueden reducir las lesiones cerebrales de origen isquémico. En el mismo sentido, el equipo de Kyuya Kogure, de la Universidad nipona de Tohoku en Sendai, aprecia una mejora en el estado de cobayas tras la administración de otros inhibidores de la proteína C kinasa. Sin embargo, uno de los autores (Zivin) ha encontrado que, en realidad, la inhibición empeora las lesiones neurológicas de los animales de laboratorio.

En el caso de los enfermos llegados al estadio de expresión, la perturbación de la actividad de los radicales libres de oxígeno tiene un atractivo especial, ya que estos compuestos son muy destructivos y su supresión no es probable que interfiera con el funcionamiento de las células sanas. Entre los posibles agentes terapéuticos se encuentra una nueva serie de inhibidores de radicales libres, los 21-aminoesteroides, sintetizados por John M. McCall, Edward D. Hall y otros, de la compañía Upjohn.

El hecho de que nos hayamos centrado sobre el glutamato no quiere decir que la perturbación de los procesos que desencadena sea la única manera de limitar la destrucción cerebral. Otras líneas de investigación se han centrado en potenciar o antagonizar otros neurotransmisores y dan muestras de poder obtener también resultados positivos en la protección de las neuronas contra las lesiones producidas por la isquemia. Por último, el estudio de la muerte de las células gliales, cuyos procesos todavía no están completamente claros, podría abrir nuevas vías para el tratamiento.



6. WOODROW WILSON, vigésimo octavo presidente de los Estados Unidos, en una imagen de 1921, dos años después de que sufriera un accidente cerebrovascular que le dejó incapacitada la mayor parte del lado izquierdo de su cuerpo. Enfermó cuando intentaba que el Congreso ratificara el Tratado de Versalles y aprobara la participación de Norteamérica en la Sociedad de las Naciones, lo que no consiguió.

No hay que descartar la consecución de terapias efectivas después de que se haya producido el daño en los tejidos. Los primeros días que siguen al ACV son un periodo crítico para la recuperación, durante el cual neuronas parcialmente dañadas empiezan a regenerar las partes lesionadas y otras neuronas entablan nuevas conexiones para compensar las pérdidas.

Una prueba de que el tratamiento

en esta fase podría tener efectos beneficiosos procede del trabajo del equipo de Dennis M. Feeney, de la Universidad de Nuevo México. Partían de la idea de que la depresión del sistema del neurotransmisor catecolamina podría contribuir a la aparición de un comportamiento en minusvalía después del ACV. Administrando anfetaminas, que aumentan la transmisión de catecolaminas, a ratas que habían sufrido una lesión en el córtex frontal se obtuvo una mejora duradera en la habilidad de los animales para caminar por un pasadizo estrecho, y lo mismo sucedió en el caso de gatos tratados. Puede incluso que algún día sean factibles intervenciones más tardías, si el transplante de neuronas permitiese a los cirujanos reponer las células cerebrales perdidas.

En última instancia, el personal sanitario combinará probablemente diferentes tratamientos, eligiendo en función de las necesidades peculiares de cada paciente. Por ejemplo, un antagonista del glutamato resulta seguro para casi todos los enfermos y puede ser administrado de forma urgente por cualquier técnico sanitario. Por el contrario, la utilización de APT o fármacos similares debe retrasarse hasta que se descarte la presencia de hemorragia con ayuda de una tomografía cerebral. Los pacientes a quienes se pueda tratar mediante ambas terapias obtendrán ventajas adicionales: Zivin ha demostrado en animales que el tratamiento combinado reduce el daño neurológico más que la utilización aislada de cada una de ellas. La terapia de eliminación del coágulo mejoraría, además, la capacidad de otros fármacos para llegar hasta el tejido isquémico.

La consecución de tratamientos eficaces sigue perteneciendo al futuro, pero ciertos métodos de prevención del ACV son ya una realidad. Su incidencia ha disminuido a lo largo de las dos últimas décadas gracias a la mayor disponibilidad de tratamientos eficaces contra la hipertensión. El riesgo podría seguir reduciéndose gracias al control de la arterioesclerosis, la patología cardiaca, la diabetes y el tabaquismo, aunque las pruebas a favor son menos concluyentes en estos casos que en el de la hipertensión.

Descubrimientos recientes indican que la técnica quirúrgica de eliminación de placas arteriales puede disminuir la incidencia de accidente cerebrovascular en enfermos arterioescleróticos; la aspirina puede ayudar a proteger a quienes hayan sufrido uno o más ataques isquémicos de aviso.

Por supuesto, ninguna de estas medidas preventivas sirve cuando se obstruye un vaso cerebral, lo que justifica la urgencia de encontrar tratamientos eficaces. Por desgracia, obtener pruebas de tal eficacia en seres humanos no será fácil. Se echan en falta mejores métodos de determinación de la cantidad de tejido lesionado y, lo que es más importante, de evaluación de los progresos funcionales. Los efectos del ACV difieren mucho de un paciente a otro, y dependen de la zona del cerebro y la complejidad de las funciones alteradas; de ahí que, para analizar los tratamientos, se necesitarán números muy altos de pacientes, quizá de hasta 1000 por ensayo clínico. Ningún centro sanitario puede estudiar un número tan elevado de casos en un periodo de tiempo razonable, lo que obligará a ensayos de cooperación multicéntricos.

Los resultados positivos generarán nuevas necesidades. Si alguno de los métodos descritos en este artículo demuestra su validez, los sistemas de asistencia médica de urgencia deberán abandonar su actual énfasis en los recursos paliativos y ponerse en condiciones de proporcionar tratamiento inmediato a los ACV, lo mismo que sucedió en el caso de los ataques cardiacos. Habrá que entrenar a miles de sanitarios en la utilización de los nuevos métodos y enseñar a la población a reconocer los síntomas de un accidente cerebrovascular.

Tareas todas de proporciones formidables, aunque ineludibles para conseguir un tratamiento eficaz del ACV. Todavía queda mucho camino por recorrer, pero existen motivos fundados para ser optimistas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MECHANISMS OF ISCHEMIC BRAIN DAMAGE. Bo K. Siesjö en *Critical Care Medicine*, vol. 16, n.º 10, págs. 954-963; octubre de 1988.

CEREBRAL HYPOXIA: SOME NEW APPROACHES AND UNANSWERED QUESTIONS. Dennis W. Choi en *Journal of Neuroscience*, vol. 10, n.º 8, págs. 2493-2501, agosto de 1990.

CEREBROVASCULAR DISEASES: SEVENTEENTH PRINCETON CONFERENCE. Durham, N. C., 16-18 de marzo, 1990. Dirigido por James N. Davis, Mark J. Alberts y Larry B. Goldstein. Suplemento a *Stroke*, vol. 21, n.º 11; noviembre de 1990.

THROMBOLYTIC THERAPY FOR STROKE. Justin A. Zivin en *Protection of the Brain from Ischemia.* Dirigido por Philip R. Weinstein y Alan I. Faden. Williams & Wilkins, 1990.

Ciencia y sociedad

Impacto en el Yucatán

Desde el mismo momento en que los científicos propusieron que el impacto de un asteroide de unos 10 kilómetros de diámetro barrió a los dinosaurios hace unos 65 millones de años, los escépticos han venido repitiendo. "Bien, ¿dónde está el cráter?" Uno tras otro han quedado descartados, porque no daban la talla o porque no daban la edad.

Pero acaba de volver a la palestra un cráter antaño rechazado, que se extiende por la costa mexicana de la península del Yucatán. "Diría que es nuestro mejor candidato", afirma Walter Alvarez, de la Universidad de California en Berkeley, quien junto a su padre, Luis, propuso la hipótesis del impacto en 1980.

En 1981, dos geólogos de la compañía nacional de petróleos de México, Pemex, sugirieron la posible existencia de un cráter, de 180 kilómetros de anchura y cubierto por un kilómetro de roca, en una región centrada en la población costera de Chicxulub. Glen T. Penfield y Antonio Z. Camargo basaban su conclusión, que presentaron en una conferencia de expertos en Houston, en mapas de anomalías gravitacionales y magnéticas de la región.

Si los geólogos tuvieran razón, el cráter de Chicxulub sería el mayor de cuantos jamás se hubieran descubierto hasta la fecha. Se hallaría, asimismo, dentro de la gama de tamaños que los Alvarez habían predicho. Pero una losa de silencio cayó sobre la hipótesis, desde que Pemex se negara a facilitar los datos geológicos y un incendio destruyera los testigos extraídos de la región de Chicxulub.

Alan R. Hildebrand no había oído hablar del cráter de Chicxulub, cuando, ocho años más tarde, comenzó a sospechar que el Caribe era el lugar del impacto asesino. Se hallaba entonces en la Universidad de Arizona. Analizando sedimentos depositados en los límites entre los períodos Cretácico y Terciario, época en la que se cree que los dinosaurios y muchas otras especies se extinguieron, Hildebrand encontró señales de que habían sido perturbados por una enorme ola de marea.

Las pruebas eran sólidas. Pero los cráteres de la región denunciados habían sido desechados. Hasta que, en marzo de 1990, Hildebrand se enteró de la ubicación de Chicxulub por un periodista del *Houston Chronicle* que había escrito sobre el tema en 1981. Sesenta y cinco millones de años atrás, el lugar yacía cubierto por las aguas, y el impacto habría creado una ola de marea devastadora.

Hildebrand entró en contacto con Penfield. No tardaron mucho en recuperar viejas muestras de sondeos de la región de Chicxulub. Con otros expertos de la Universidad de Arizona, incluido William V. Boynton, el director de tesis de Hildebrand, examinaron las muestras. Penfield tenía razón.

Para Boynton, los datos ponen la cota superior de la fecha del impacto en 67 millones de años y el límite inferior en 55 millones. El método de datación por análisis de la desintegración radiactiva en rocas del cráter ajustará la fecha con mayor precisión.

Nuevas pruebas se van sumando. Un grupo encabezado por Kevin O. Pope, de Geo Eco Arc Research, informaba recientemente en *Nature* de su descubrimiento de un anillo de sumideros que señalan el borde de la parte del cráter situada en tierra. Pope explica que los sumideros se formaron, seguramente, por agua freática que se filtraba a través de las rocas fracturadas del borde del cráter. Pero los opuestos a la hipótesis del impacto no parecen proclives a cambiar todavía de criterio. Charles B. Officer, de Dartmouth, preguntado sobre los hallazgos del Yucatán, contesta bruscamente: "Es un burdo disparate, y no quiero decir nada más sobre el asunto".



1. ANILLO DE SUMIDEROS que marca el borde de un enorme cráter enterrado en Yucatán.

Pequeñas perturbaciones

Cierto día de 1827 Robert Brown, naturalista escocés, escrutaba una muestra de agua de charca en su microscopio. Estaban los granos de polen, como era de esperar. Pero, ¿qué era aquella danza que bailaban? No podía sospechar que la investigación de aquellas sacudidas aleatorias, del movimiento browniano, aportaría descubrimientos de enorme trascendencia durante el siglo XX: la primera prueba definitiva de la existencia de átomos, las estimaciones del número de Avogadro, la matemática del movimiento aleatorio en mecánica cuántica y un modelo teórico de ciertas microfluctuaciones de la economía.

Pero alguien ha movido con mayor viveza el estanque de la historia. En un resumen publicado en la revista *Bulletin of the American Physical Society*, Daniel H. Deutsch, de Pasadena, viene a negar que Brown observara el movimiento que lleva su nombre. Las pequeñas perturbaciones que le intrigaron pudieron ser, simplemente, pequeñas perturbaciones, sin más.

Aunque otros microscopistas habían advertido aquellos movimientos errantes, fue Brown quien se decidió a estudiar el fenómeno. Repitiendo sus observaciones con trozos de cristal y partículas de polvo, además de polen, demostró que los movimientos extraños no eran propiedad exclusiva de la materia viva. Sin éxito, los físicos del siglo XIX aventuraron una explicación tras otra sobre su causa. Consideraron la posibilidad de que las corrientes convectivas de la gota provocaran el movimiento de las partículas, pero abandonaron la idea tras observar que no había ninguna correlación con el movimiento de otras partículas vecinas.

Albert Einstein encontró, sin pretenderlo, la fuente del movimiento browniano en 1905. Buscando pruebas de que el átomo era una entidad física real y no mero constructo práctico, advirtió que la presión de las moléculas que chocaran contra una partícula en suspensión variaría de forma aleatoria en cada lado. Por consiguiente, la partícula andaría errática por el medio. Hasta que no publicó su idea, no se enteró de que Brown y otros habían visto ya aquel movimiento. Jean Baptiste Perrin, de la Universidad de París, verificó más adelante el trabajo de Einstein midiendo el movimiento browniano de

partículas en suspensión y usándolo para determinar el número de Avogadro. Perrin recibió el premio Nobel de física en 1926.

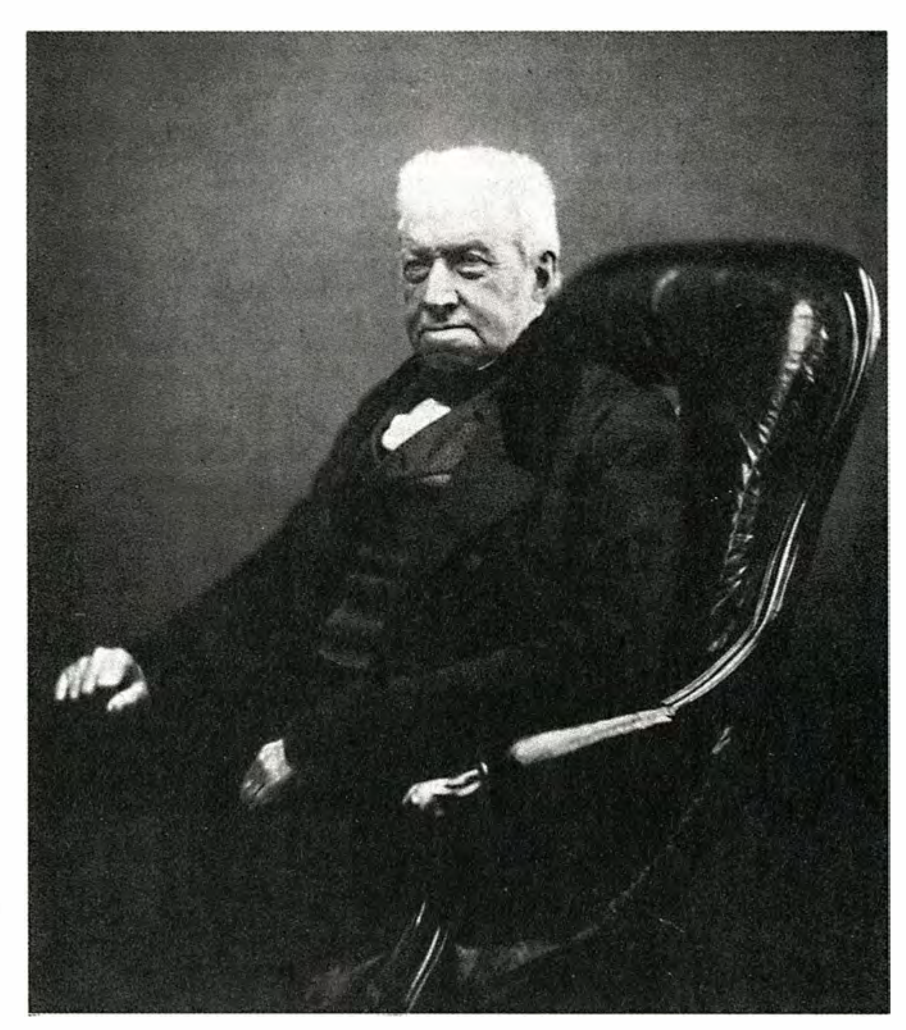
Y aquí es donde interviene Daniel Deutsch, para quien resulta imposible que Brown observara, con el equipo de que disponía, el mismo movimiento que Einstein describió. El microscopio simple de Brown tenía 350 aumentos; en esta escala, sólo podría apreciarse el movimiento browniano de partículas del tamaño de una micra (una millonésima de metro). Muchos de los granos de polen y de las partículas de polvo decuplicaban, por lo menos, esa magnitud y su movimiento browniano sería imperceptible.

¿Qué es, pues, lo que vio Brown? Segun Deutsch, el movimiento de las partículas podría deberse a las vibraciones del entorno y a corrientes de convección. Vibraciones que hoy evitan los nuevos microscopios. Pero hasta mediados del siglo XIX no se incorporaron los cubreobjetos para proteger las muestras; por consiguiente, las partículas que observó Brown se movían quizás a instancias de las corrientes originadas por la evaporación. Con la evolución y refinamiento de los microscopios, los observadores pudieron apreciar el movimiento molecular, que confundieron con el descrito por Brown.

Nadie se atreve, sin embargo, a apear a Robert Brown de su peana. Joachim Burgdeorser, físico de la Universidad de Tennessee y experto en fase líquida de la materia, después de leer el resumen del trabajo de Deutsch opina que habrá que esperar un estudio más pormenorizado, prueba que Deutsch confía en tener a punto de aquí a un año.

¿Ondas o partículas?

Una porción de materia o energía la veremos actuar como partícula o como onda, pero nunca observaremos a la vez ambos comportamientos. En ello consiste el principio de complementariedad, uno de los fundamentales de la mecánica cuántica.



2. ROBERT BROWN, naturalista del siglo XIX, es conocido por su estudio del movimiento que lleva su nombre. Pero, ¿lo observó en realidad? Foto: cortesía de la Colección Granger.

No es fácil someter a prueba ese axioma. Creíase que cualquier experimento encaminado a verificar la complementariedad pecaría de tosquedad, limitación que, para algunos, constituía la razón de que jamás se haya visto una conducta corpuscular y ondulatoria a la vez.

El desarrollo reciente del máser monoatómico, entre otras técnicas, ha posibilitado la construcción de un delicado dispositivo que mide la posición de un átomo y, al menos en teoría, altera su comportamiento ondulatorio de una forma predecible. Este aparato ha traído la esperanza de poder cazar un átomo que muestre ese doble comportamiento.

No es asunto de prestidigitación. La teoría establece que, en cuanto el ingenio se apresta a medir la posición de los átomos, se pierde su comportamiento ondulatorio. En este sentido, los experimentos han confirmado cada punto observable de la teoría.

El dispositivo diseñado para someter a prueba el principio de complementariedad es una variación inteligente del viejo experimento de la doble rendija. En la versión original, una fuente emite átomos hacia una pantalla que posee dos rendijas. Si el átomo pasa por una de ellas, produce una mancha blanca en una emulsión fotográfica que hay instalada allende la pantalla. Con el paso de un millón de átomos por la pantalla, se crea en la emulsión una distribución característica de bandas blancas.

La mecánica cuántica da cuenta de ese patrón típico. En su avance hacia la pantalla, el átomo se comporta como una onda, capaz de combinarse con otras ondas atómicas o de cancelarse con ellas. Las dos rendijas semejan las escolleras de un puerto, que dividen la onda atómica en dos partes que se interfieren mutuamente. Es más probable encontrar al átomo en un punto de la emulsión donde las ondas interfieren constructivamente. Después de que muchos átomos hayan realizado el mismo proceso comienza a percibirse que las regiones donde incidirán con mayor probabilidad son las que, por culpa de la interferencia, conforman bandas brillantes.

Todo parece correcto, salvo una particularidad: esta explicación implica que el átomo ha pasado por las dos rendijas a la vez y ha interferido consigo mismo. La verdad es que cada átomo ha pasado por una u otra rendija, pero cuantos intentos se han realizado hasta ahora para determinar la ruta individual, sin perder su comportamiento ondulatorio, se han visto frustrados por causa del principio de incertidumbre de Heisenberg o, en

palabras llanas, por la tosquedad del experimento.

Dicta el principio que, tan pronto midamos la posición del átomo, su momento cambiará en un valor impredictible. Modificado el momento, varían las propiedades ondulatorias del átomo, y desaparece el diagrama de interferencia. "Nadie pudo nunca (ni siquiera se lo ha propuesto) darle la vuelta al principio", afirmaba Richard P. Feynman en sus *Lectures on Physics* publicadas en 1965.

Un cuarto de siglo después, parece que sí se ha encontrado un camino. Julian Schwinger, de la Universidad de California de Sur, y Marlan O. Scully, de la Universidad de Nuevo México, junto con Herbert Walther y Berthold-Georg Englert, del Instituto Max-Planck de Optica Cuántica, han concebido un experimento de la doble rendija modificado que sortea el principio de incertidumbre. En su versión del experimento, publicado recientemente en *Nature*, se colocan dos pequeñas cavidades ante la pantalla. Las cavidades, agujereadas, dejan pasar los átomos. Un haz láser, que ilumina los átomos cuando entran en las cavidades, está sintonizado de suerte tal que cualquier átomo que lo atraviese se excitará por absorción de un fotón de gran energía. Además, siempre que un átomo excitado pasa por la cavidad, libera un fotón de baja energía. (Estas cavidades desempeñaron un papel decisivo en la creación del máser monoatómico.)

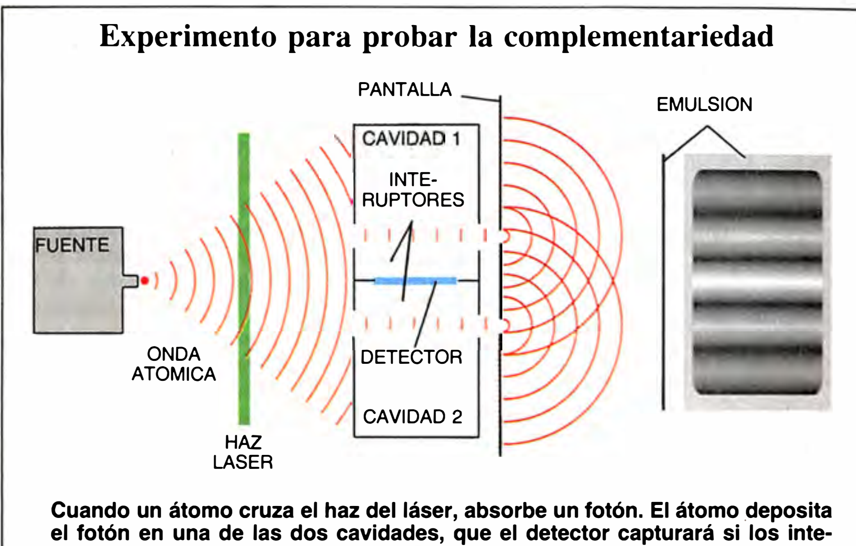
El experimento empieza cuando los átomos pasan, uno a uno, por el haz del láser, por las cavidades y por las rendijas. Cada átomo absorbe un fotón de alta energía y libera luego un fotón de baja energía en el interior de una cavidad. La presencia de un fotón en una cavidad denuncia por qué rendija pasó el átomo.

Al absorber el fotón de alta energía antes de entrar en el sistema cavidad-rendija, la influencia del fotón de alta energía es irrelevante. Si repitiéramos el experimento sin utilizar las cavidades y permaneciera el átomo en un estado excitado, los resultados serían los mismos que en el experimento original de la doble rendija.

Pero las cosas difieren bastante con las cavidades en su sitio. Cuando un átomo libera un fotón de baja energía, su momento cambia de una forma predictible; no varía, pues, de manera aleatoria como ocurre en los sistemas donde interviene el principio de incertidumbre. El experimento con la cavidad acierta a descubrir por qué rendija pasó el átomo sin sacrificar la onda atómica.

Ello no obstante, cuando el átomo señala su posición mediante liberación de un fotón de baja energía, pierde la capacidad de interferir consigo mismo. Pérdida de interferencia en estos experimentos que podría atribuirse a las correlaciones entre las ondas atómicas y el acto de medir el camino seguido por los átomos en las cavidades. Debido a ello, no aparece la distribución característica de bandas brillantes y oscuras. El principio de complementariedad viene así reforzado por otro mecanismo distinto del principio de incertidumbre.

Experimento para probar la complementariedad



Cuando un átomo cruza el haz del láser, absorbe un fotón. El átomo deposita el fotón en una de las dos cavidades, que el detector capturará si los interruptores están abiertos. El átomo atraviesa una de las dos rendijas e incide en la emulsión. Si este proceso se repite millones de veces, veremos en la emulsión una distribución característica de bandas brillantes y oscuras.

Hay en estudio otro test que sirve para revelar ciertos aspectos peculiares de la complementariedad. El "borrador cuántico", así se llama el experimento, debería demostrar que, aunque la información acerca del recorrido de un átomo se almacenara y después se borrase, persistirían las propiedades ondulatorias del átomo. Esta idea fue avanzada a comienzos de los ochenta por Edwin T. Jaynes, de la Universidad de Washington en San Luis, y Scully.

Se trata, ahora, de alojar un detector entre las dos cavidades, amén de sustituir una pared de cada cavidad con un obturador. Los fotones procedentes de las cavidades llegarán al detector si los obturadores se hallan abiertos. Se comienza con los obturadores cerrados; un átomo entra en una de las dos cavidades, donde deposita un fotón; mientras el fotón rebota por la cavidad, el átomo atraviesa la rendija correspondiente e incide sobre la emulsión produciendo una mancha blanca.

Un instante después, los obturadores se abren simultáneamente. El fotón, que sigue moviéndose por la cavidad, de acuerdo con la teoría cuántica tiene un 50% de oportunidades de ser absorbido por el detector. Si el detector captura el fotón, queda marcada la mancha en la emulsión. Lo que puede cumplirse con cualquier mecanismo que coloree de azul la mancha, señal cromática que representa un átomo cuya información sobre el camino se borró definitivamente, en cuanto el átomo golpeara la emulsión. Si el detector no absorbe el fotón, la mancha adquiere un tono rojizo, que indica la posible pérdida o no de la información sobre el camino. Tras el paso de muchos átomos por el dispositivo experimental y la coloración pertinente de las manchas de la emulsión, nos encontraremos con un patrón de bandas azules y rojas, según predice la teoría.

Lo notable del caso es que semejante distribución emerge aun cuando se desvanezca la información sobre el camino que sigue el átomo, tras incidir éste en la emulsión. Diríase que los átomos "saben" dónde deben incidir sobre la emulsión antes de que el aparato les "señale" hacia dónde encaminarse. Scully y su equipo acaban de resolver esa paradoja dentro del contexto matemático de la mecánica cuántica.

¿Qué ocurriría si los experimentos no produjeran una distribución de bandas azules y rojas? Según Scully, la culpa sería de los experimentos.

Solomon H. Snyder: desconcierto cerebral

Cumplidos los 52 años de edad, se le asocia todavía a sus famosos trabajos de dos decenios atrás sobre el receptor de los opiáceos y sobre los

propios opiáceos del cuerpo humano, las encefalinas y las endorfinas. Pero no se agota ahí lo que la neurología debe a Snyder; por citar alguna muestra más: desarrollo de técnicas para estudiar los receptores, elucidación de determinados aspectos de la comunicación neuronal y de la olfacción, cultivo *in vitro* de neuronas humanas que se dividen sin cesar y, lo más reciente, descubrimiento de lo que tal vez sea una nueva clase de neurotransmisores.

Prefiere dedicarse a la especulación y al diseño de nuevos experimentos más que a su realización, tarea que deja en manos de sus colaboradores y alumnos. Se excusa confesándose un tarugo para la labor rutinaria de laboratorio, pero su maestro y premio Nobel Julius Axelrod, bioquímico del Instituto Nacional de la Salud Mental, no piensa así: "Decir eso queda bien, y a él le gusta decirlo. La verdad es que sus manos no son nada torpes."

No deben serlo cuando dedica su tiempo libre a la música, tema recurrente en su obra. Su despacho, que semeja un confortable cuarto de estar, rebosa de imágenes gráficas y modelos reales de su instrumento preferido, la guitarra. Aunque sus padres le animaban a que se hiciera músico, él se resistió: "Yo era más conservador que mi madre y que mi padre". A mí me gustaba convertirme en psiquiatra. Esperando —dice— arreglárselas bastante bien con la ciencia que se requiere para tan selecta profesión, ingresó en la Facultad de Medicina de Georgetown.

Atribuye a la guitarra el mérito de haberle orientado hacia la investigación. A la edad de 19 años, estaba dando lecciones de guitarra y uno de sus discípulos, un investigador del Instituto Nacional de la Salud, le dijo que necesitaba un técnico para el verano. Snyder ocupó aquel puesto. "Caí en la cuenta de que la investigación no se identifica en absoluto con la ciencia. Ciencia viene a ser que tomas unas medidas, unos números, los analizas y... ¡ya está! Sólo la investigación es creadora", asegura. "¡Vas descubriendo, componiendo!"

Terminada la carrera pasó un curso como interno en San Francisco, donde un experimento personal con el alucinógeno LSD aumentó su interés ya grande por la psicofarmacología. Aunque llegó a sentir pánico con las muchas horas que duraba el influjo de la droga, aquella experiencia le hizo "percatarse de que hay más conocimientos que el conocimiento ordinario y de que en el interior del cerebro ocurren cosas increíbles".

No ha decaído su aprecio por el valor de las drogas para desentrañar el funcionamiento del cerebro. "La mayor parte de lo que sabemos hoy de los neurotransmisores se lo debemos a las drogas que los afectan", explica. El ha manejado este instrumental con consumada destreza. Su fama, recordábamos, se inició a partir de su trabajo sobre las acciones de los opiáceos en el cerebro. En 1971, durante la campaña del presidente Richard Nixon contra las drogas, el gobierno federal empezó a financiar investigaciones que pusieran en claro las bases neuroquímicas de la adicción a la heroína, esperando así poder remediarla. Snyder, que había trabajado en el laboratorio de Axelrod estudiando neurotransmisores y el efecto de las drogas sobre el sistema nervioso, era por entonces profesor de farmacología y psiquiatría en la Johns Hopkins.

Mediante un ingenioso experimento directo, Snyder y Candice Pert, una doctoranda de su equipo, consiguieron, en 1973, aislar el receptor del opiáceo. Su trabajo abrió amplias perspectivas en el campo de la psicofarmacología: implicaba que en adelante podría disponerse de receptores para aliviar el dolor sin causar adicción, así como para tratar la adicción y, quizá también, los trastornos mentales.

La técnica que ambos pusieron a punto para estudiar los receptores cerebrales —enlace de ligandos reversibles— sigue siendo imprescindible en investigación neurológica. Snyder y Pert utilizaron, para unirlos al receptor, opiáceos marcados con isótopos muy radiactivos. Lavaron luego rápidamente las células, de modo que sólo quedasen los opiáceos que se habían unido a los receptores. Con los opiáceos indiscriminantes ligeramente adheridos a cualquier tejido así lavado, pudieron identificar luego los sitios de unión y las características de cada receptor.

Los experimentos elegantes constituyen la clave de la investigación de calidad, afirma. "Si puedes realizar uno en un solo día, en 10 días puedes someter a prueba 10 ideas, y tal vez una de las 10 resulte acertada. Habrás cumplido, entonces, con tu tarea."

Poco después del descubrimiento del receptor de los opiáceos, John Hughes, ahora en Parke-Davis, y Hans W. Kosterlitz, de la Universidad de Aberdeen, identificaron los calmantes o analgésicos naturales que hay en el cuerpo humano. Pert y Snyder publicaron los mismos resultados algunos meses más tarde, pero ellos habían ocupado ya con anterioridad las cabeceras de los periódicos. En

1978 Snyder, Hughes y Kosterlitz compartieron el premio Albert Lasker a la investigación biomédica básica por su trabajo sobre las encefalinas y el receptor de los opiáceos.

También ha hecho alguna incursión en la industria privada: en 1982 él y sus socios capitalistas David e Isaac Blech fundaron en Baltimore una empresa dedicada a la biotecnología, Nova Pharmaceutical. Aunque esta compañía no ha producido aún ninguna droga basada en la tecnología receptorial, varios de tales componentes se hallan en fase de pruebas clínicas.

En el laboratorio de Snyder se trabaja ahora en el receptor de la benzodiazepina, sitio donde se enlaza el valium. Pero lo que por el momento le absorbe mayor atención es una idea totalmente nueva. La exploración de lo que quizá sea un nuevo tipo de neurotransmisor, uno que no actúa sobre los receptores tradicionales. Ciertas sustancias químicas muy reactivas, tales como el óxido nítrico y el monóxido de carbono, se difunden pasando de una célula nerviosa a otra para transmitir mensajes, orillando el modelo clásico de receptor.

Hace alrededor de una década se descubrió la presencia de óxido nítrico en las células endoteliales o interiores de los vasos sanguíneos. Llamado originalmente factor relajante derivado del endotelio, el óxido nítrico se difunde desde la pared del vaso sanguíneo hasta los músculos adyacentes, instando la relajación de éstos y la dilatación de los vasos. El compuesto, que tiene una vida media de cinco a 10 segundos cuando está en el interior del cuerpo, se halló ser también el metabolito activo de la nitroglicerina, lo cual podría explicar la eficacia de esta sustancia en el tratamiento de las enfermedades del corazón.

"No podíamos dejar de estudiarlo", dice Snyder de sí mismo y de su alumno David S. Bredt. "¡Por Dios! Me sospecho que se trata de un nuevo tipo de mensajero. Decidimos ambos averiguar si el óxido nítrico se produce en el cerebro, idea que había sido sugerida por John Garthwaite, de la Universidad de Liverpool, y Salvador Moncada, de los Laboratorios Wellcome, y, si así fuese, qué función desempeñaba".

Nuevamente, pergeñó un sencillo procedimiento de prueba, que les permitió medir niveles de un más longevo subproducto de la creación de óxido nítrico, una sustancia con una vida media mucho más larga. Descubrieron la presencia efectiva de óxido nítrico en el cerebro, así como su unión con el hierro en una enzima que interviene en la síntesis de guanosín monofosfato cíclico (GMPc), compuesto implicado en la cadena de acontecimientos que se suceden a raíz del engarce del neurotransmisor con un receptor. Acaban de identificar, además, unas neuronas específicas que producen otra enzima, la óxido-nítrico sintetasa.



3. SOLOMON H. SNYDER, neurobiólogo del cerebro. Foto: Chris Usher/Black Star.

"¿Quién supo nunca de un receptor tal como el hierro? ¿El hierro, receptor?" Las preguntas, en sus labios, parecen las de un cómico que suelta un disparate. Eso es "un concepto completamente nuevo en la neurocomunicación. Es lo más fascinante que he visto en 10 años: un nuevo principio biológico sobre cómo funcionan las cosas."

Snyder apenas logra refrenar su entusiasmo. Puesto que el óxido nítrico interviene en la regulación de la presión sanguínea, ¿qué mejor candidato —dice— a una anormalidad genética responsable de la hipertensión? Y señala que su laboratorio ha aportado pruebas de que el monóxido de carbono puede funcionar de manera análoga a la del óxido nítrico.

Según Snyder, la idea de buscar óxido nítrico en el cerebro es un perfecto ejemplo de cómo aprovechar los avances conseguidos en otras áreas de la ciencia y aplicarlos a la neurología, proceder que él reconoce como una fuente de progresivas inspiraciones junto con la intuición y las ideas de sus alumnos. "Cuando leo algo acerca del corazón, pienso '¿Tendrá esto que ver con el cerebro?' Al enterarme de algo sobre genes cancerosos, me digo '¿Tienen que ver con el cerebro?'" Y recalca que "algunos de los mejores avances provienen del cruce de fronteras".

Otro descubrimiento reciente del que queda mucho por saber es el concerniente al cultivo continuo de neuronas humanas *in vitro*. Hace cuatro años se obtuvo en su laboratorio tejido del córtex cerebral de un niño de 18 meses al que se le estaba sometiendo a una operación para reducir su megaloencefalia. Normalmente las neuronas no se reproducen o dividen, pero éstas sí que lo hacían y aún lo siguen haciendo, aunque nadie sabe por qué ni cómo. "Hemos enviado células de éstas a más de 200 laboratorios", dice Snyder. "Tienen todas las propiedades de las neuronas; hacen todo lo que las neuronas hacen".

Habla con entusiasmo de su posible empleo para transplantes de cerebro. El cirujano podría implantar con precisión estas neuronas en determinada región del cerebro que hubiese sido dañada o puede que incluso destruida por la enfermedad de Alzheimer y ver cómo se desarrollan allí, expone. Y añade que investigadores de su laboratorio han realizado ya con éxito transplantes en ratas y tienen el plan de pasar a efectuarlos en monos dentro de pocos meses.

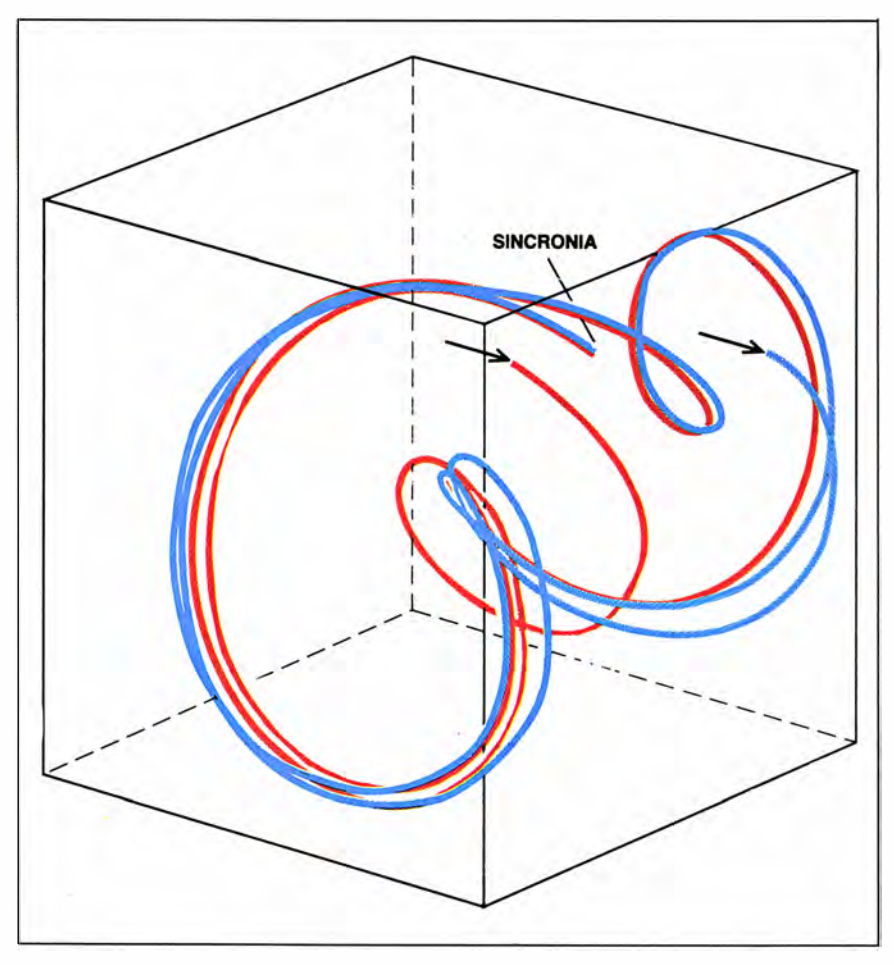
La idea de un nuevo experimento elegante ronda su mente. Preguntado acerca de la posible conexión entre el deterioro mental que acompaña a la deficiencia de hierro y la importancia del hierro en los sitios de unión para el óxido nítrico, las manos y los ojos de Snyder sufren un repentino frenazo... pero su voz se acelera. En tono muy alto se lanza a enumerar rápidamente las complicadas relaciones del hierro, el óxido nítrico y el GMPc. "¡Oh!", exclama después pensativamente, "podría usted comprobar esto con mucha facilidad".

Ordenando el caos

Caos evoca desorden y confusión. O esa imagen traía. A lo largo de los últimos diez años, la física de los sistemas no lineales ha ido desenmascarando la existencia de una sutil estructura en los mismos. Algunos investigadores acaban de empeñarse en demostrar que podemos sacarles partido comercial a esas regularidades escondidas.

Se trata de un trabajo experimental que pretende abrir una nueva vía a la ingeniería. En palabras de William L. Ditto, adscrito al Centro de Guerra Naval en Superficie, "asistimos a un extendido interés por aprovechar de verdad la riqueza de los sistemas caóticos". Los experimentos se apoyan en el rápido avance teórico que registra ese dominio de la física. En 1990, Edward Ott, Celso Grebogi y James A. Yorke, de la Universidad de Maryland, observaron que el movimiento caótico se componía, en realidad, de un número infinito de movimientos periódicos inestables, u órbitas. E infirieron, en lógica consecuencia, que cualquier comportamiento caótico podría transformarse en movimiento periódico regular mediante la aplicación continua de pequeñas fuerzas que lo empujaran a una de esas órbitas.

En diciembre de ese año, el grupo de Ditto corroboró la hipótesis. Junto con Steven N. Rauseo y Mark L. Spano, Ditto había venido trabajando con materiales "inteligentes", es decir, materiales capaces de desarrollar reacciones no lineales frente a las fuerzas aplicadas. Había uno en particular, una cinta magnetoelástica, que alteraba su rigidez en presencia de un campo magnético variable. En la vecindad de un pequeño campo magnético, la cinta se mantenía tiesa; al intensificarse el campo, aumentaba la elasticidad de la cinta. La mayor intensidad del campo terminaba por lanzarla a una danza caótica y ondulante.



1. SINCRONIA DEL COMPORTAMIENTO CAOTICO. Dos circuitos electrónicos comienzan generando señales caóticas (identificadas mediante dos flechas). *Cuando los investigadores emplean la salida de un circuito para modular el otro, las dos señales se sincronizan, y así permanecerán indefinidamente.* (Fuente: Louis M. Pecora y Thomas L. Carroll, del Laboratorio de Investigación Naval.)

Registrando los cambios de forma de la cinta, el grupo creó un mapa de su atractor caótico, o patrón, del movimiento. A tenor de la teoría, algunos puntos de esa configuración deberían corresponder a órbitas periódicas específicas. Ditto y sus colegas escogieron una órbita, esperaron hasta que la cinta se moviera en ella y aplicaron entonces pequeños ajustes al campo magnético. Mientras modulaban la fuerza, movíase la cinta con periodicidad regular. En cuanto dejaron de hacerlo, adquirió otra vez su comportamiento caótico.

Ditto ha comenzado una línea de colaboración conjunta con Louis M. Pecora, del Laboratorio Naval de Investigación, quien ha desarrollado técnicas experimentales para sincronizar señales caóticas. "Tuve la idea en enero de 1989", dice Pecora. En menos de un año, Pecora y su adjunto Thomas L. Carroll habían construido sus primeros circuitos caóticos sincronizados, de extraordinaria sencillez. Menos llanos son los principios matemáticos que les dan soporte, así como la coordinación de las señales. Pecora desarrolló un criterio de estabilidad que describe las señales caóticas específicas que hacen que se sincronicen los sistemas no lineales. En el laboratorio, Pecora y Carroll construyeron un circuito general que generaba una señal caótica y un subcircuito que reproducía parte del primer circuito; el segundo también operaba caóticamente. Pero cuando superpusieron la señal del circuito completo sobre la señal del subcircuito, las salidas se sincronizaron.

Pecora y Carroll mostraría luego otra clase de sincronización. En un trabajo enviado a *Physical Review Letters*, describen cómo construyeron dos circuitos independientes e impul-

sados por la misma señal periódica. Al principio, el sistema funciona de manera limpiamente periódica. Pero una pequeña diferencia en las condiciones iniciales hace que, con el tiempo, ambos circuitos dejen de estar en fase. "Lo sorprendente del caso es que esto se corrige añadiendo caos", dice Pecora.

Hasta la fecha, los proyectos ingenieriles se empeñaban en desechar cualquier comportamiento no lineal de los sistemas. Pero ha llegado el momento de invertir la tendencia. Pensemos en las pautas biológicas, muchas de ellas caóticas como los latidos del corazón; Pecora está investigando si sus técnicas pueden suministrar un procedimiento más suave para devolver a un corazón en fibrilación su ritmo propio. En esa misma línea, los ordenadores de redes neurales podrían constituir otros beneficiarios de la sincronización caótica.

Entre quienes exploran las aplicaciones del caos en el procesado de señales se encuentra Stephen M. Hammel, del Centro de Guerra Naval en Superficie. Hamel ha creado una técnica para identificar una señal caótica en medio de un ruido aleatorio. En unión de Yorke y Grebogi, comenzó atacando un clásico dilema calculatorio: ¿es correcto el resultado de una serie complicada de cálculos de ordenador o se han desviado éstos caóticamente de la respuesta correcta? Examinando soluciones parciales del problema en una demostración asistida por ordenador, demostraron la existencia real de una solución "verdadera" cercana a la proporcionada por el computador.

Hammel usó entonces la demostración para desarrollar una técnica práctica mediante la cual reducir el ruido que enmascara una señal caótica. A diferencia de los sistemas lineales, que amortiguan el ruido global de un sistema en un porcentaje medio, él ofrece una mejora espectacular de ciertas porciones de una señal —aunque se deje intacto el resto— dependiendo de las características matemáticas de la señal subyacente.

La manipulación de segmentos de la señal puede aportar información suficiente para acotar ésta. Sus colegas del Laboratorio Nacional de Oak Ridge le sugirieron a Hammel que ensayase su técnica con una colección de datos: una serie cronológica de los ruidos que produce el sistema de intercambio de calor en el interior de un reactor nuclear. "Se trata de una señal muy enrevesada, con un sinfín de ruidos, desde las bombas a los cojinetes y al líquido refrigerante en circulación", explica. Cree que puede recuperar parte suficiente de la señal y descubrir así el cambio, en función del tiempo, de los componentes, tarea que queda siempre lejos del dominio tradicional del procesado de señales. Si lo consigue, el procesado de señales caóticas se convertiría en una técnica de sondeo inocua y manejable.

Una aplicación más inmediata del procesado de señales podría residir en la creación de códigos, de origen caótico, para la comunicación celular y el cifrado de información secreta. En esa línea, Harold M. Fredricksen, de la Escuela Naval para Posgraduados, ha venido investigando pautas caóticas con el fin de establecer un esquema de cifrado de datos que alivie la sobrecarga de las radiocomunicaciones. Se trata, en definitiva, de conjugar dos campos: el de los sistemas dinámicos y los algoritmos de cifrado de comunicaciones.

Los sistemas de transmisiones por radiodifusión usan algoritmos que asignan los datos a intervalos de tiempo en un orden previsible o en una sucesión aparentemente aleatoria. Los receptores reúnen esos datos en un mensaje coherente. Con el empleo de señales caóticas en su lugar, Fredricksen calcula que podrá aumentar espectacularmente la cantidad de tráfico que se puede transmitir sin pérdida de señal por interferencia debilitante. "El potencial proviene de la naturaleza, conocida pero imprevisible, del proceso caótico", apostilla.

Biocerámicas

Las articulaciones artificiales cumplen a la perfección un doble cometido mecánico: aguantar el peso que les oprime y posibilitar el movimiento repetitivo. Ahora bien, conseguir que el hueso se suelde firmemente con las superficies metálicas de las prótesis ortopédicas es harina de otro costal. Han dado buen resultado las superficies porosas, las rugosas, con ranuras o incluso con recubrimientos irregulares. Pero una articulación defectuosamente encajada termina por bambolearse dolorosamente y quedar envuelta en tejido fibroso.

Los bioingenieros han descubierto la forma de que las células óseas crezcan hasta la misma superficie de la prótesis, consolidando el repuesto de suerte que apenas se distinga del hueso sano. Podrían lograr ese milagro los recubrimientos cerámicos cuya estructura química remeda la del hueso natural. Las principales compañías ortopédicas del mundo caminan en esa dirección.

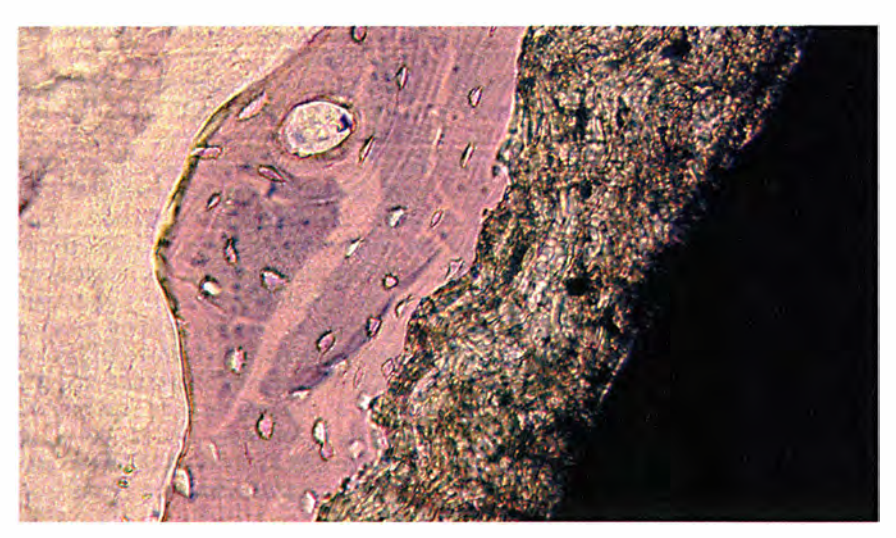
Los ojos están puestos en el hidroxiapatito (HA), forma cristalina del fosfato cálcico de composición parecida a la que tienen nuestros huesos. Hay diminutos cristales de HA que están exactamente separados por 64 nanómetros a lo largo de las fibras de colágeno que dan a los huesos largos su resistencia tensil. Diferentes proporciones de los mismos átomos forman también el fosfato tricálcico (FTC), una cerámica similar que estimula el crecimiento de los huesos antes de disolverse. No es, pues, de extrañar que la investigación se centre en los recubrimientos de fosfato cálcico.

En los Estados Unidos, las autoridades sanitarias han concedido licencia a dos empresas para la comercialización de prótesis de cadera recubiertas de HA. Otras dos están ensayando la generalización del método a otras articulaciones.

Quien refinara la prótesis podría llevarse una ración sustanciosa de la tarta. El año pasado se implantaron casi 400.000 caderas artificiales en todo el mundo, así como 150.000 rodillas. Las caderas de repuesto pueden llegar a costar medio millón de pesetas, sin contar la sobretasa por recubrimiento. Sobre la legitimidad de esto último discrepan los expertos, porque las autoridades aprobaron la prótesis en razón de su equivalencia con otras ya existentes, pero no porque comportara ninguna mejora reconocida.

Está, además, en el aire la cuestión de la estabilidad y eficacia a largo plazo de los recubrimientos. Aunque constituyen el armazón de desarrollo de nuevo hueso en los animales experimentales, lo que podría explicarse por la enorme rapidez con que éstos los reparan, se desconoce hasta qué punto actuarían igual en los humanos. Agréguese a ello que ninguno de tales recubrimientos es completamente estable. Desaparecen sin que se sepan sus consecuencias.

Para salir al paso, y dar una explicación, suele aducirse que las biocerámicas guardan una estrecha semejanza con el hueso natural, por lo que la disolución no constituye ningún problema, cuando no resulta incluso deseable. Lo cierto es que los primeros aparatos recubiertos con HA que se implantaron de forma experimental en Europa sólo tienen cuatro años, y la mayoría no llega a los dos. Los expertos se mueven, pues, entre conjeturas, sin poder pronunciarse con seguridad en ningún sentido.



2. *RECUBRIMIENTO BIOCERAMICO de hidroxiapatito* (castaño). *Estimula el desarrollo de las células óseas* (púrpura) *cerca de la superficie de una cadera artificial.* (Fotografía de John P. Collier.)

Los defensores de los recubrimientos biocerámicos señalan que cierta forma de HA se ha venido empleando en odontología desde hace diez años, sin que se hayan descrito efectos perjudiciales, para llenar huecos de dientes y robustecer mandíbulas. Los gránulos se mezclan algunas veces con sangre y fragmentos de hueso recién limados y se pegan alrededor de injertos de huesos o graves fracturas.

El cirujano ortopédico les saca mayor partido. Los fabricantes aplican ellos mismos el recubrimiento biocerámico o envían sus prótesis para tratamiento a empresas especializadas, que guardan celosamente sus técnicas industriales.

La cerámica en polvo se aplica mediante pulverización con plasma, que bombardea la prótesis con HA ionizado a temperaturas de 10.000 a 15.000 grados Celsius. La forma de la prótesis y el ángulo de pulverizado influyen en las propiedades finales del recubrimiento, que a su vez determinan la probabilidad de que el material se agriete o desgaste. La amplia variedad de procesos de fabricación explica las diferencias en solubilidad, adherencia al sustrato y carácter cristalino.

Son objeto de investigación las reacciones físicas y químicas que se desarrollan en tales recubrimientos. Algunos han hallado que las biocerámicas liberan calcio y fosfato, que el cuerpo precipita después en forma de matriz orgánica mineralizada en la superficie del hueso. Las pruebas mecánicas indican que esta superficie intermedia entre el hueso y el recubrimiento de HA es muy fuerte. Preocupa, sin embargo, que el proceso debilite el recubrimiento.

La desintegración de los recubrimientos podría traer complicaciones a largo plazo. Las partículas sueltas podrían erosionar el hueso circundante y la misma prótesis, provocando inflamaciones. En la estela de reciente publicidad negativa sobre válvulas cardíacas averiadas o productos químicos lixiviados por implantaciones en mamas, los investigadores ortopédicos están redoblando sus esfuerzos para estabilizar sus recubrimientos.

Cénit y ocaso de las ciudades

En los años cincuenta, Pittsburgh, sede de la industria siderúrgica norteamericana, era un emporio industrial. Ciudad con tal concentración tecnológica no podía sino ir a más. Lo contrario que Phoenix, una ciudad de economía incierta y auténtico almacén de "comercio al por mayor", donde lo mismo se vendían tractores que grifos.

Cuarenta años más tarde, ¿qué ha pasado? Phoenix se muestra pujante, en tanto que Pittsburg se hunde. ¿Por qué? "El cínico de turno diría que la temperatura desempeñó un papel más importante en el crecimiento de la ciudad o que estamos asistiendo a la caída de la industria estadounidense", ataja José A. Scheinkman, economista de la Universidad de Chicago, que trabaja en equipo con Andrei Schleifer, de la Universidad de Harvard, y dos discípulos de éste, Edward L. Glaeser y Hedi D. Kallal. Los economistas sostienen haber dado con una explicación verosímil, sugerida hace varios años por Jane Jacobs, experta en demografía urbana: las ciudades florecen cuando sus industrias están muy diversificadas y son altamente competitivas.

La cuestión sobre el motor del crecimiento ha intrigado a los economistas de todos los tiempos. En puridad académica, éstos atribuyen el crecimiento al aumento de la razón capital/trabajo, mayor tasa de empleo e innovación técnica. Robert M. Solow, premio Nobel de economía, demostró que, de los tres factores, la técnica era el decisivo.

Pero, ¿por qué la técnica se asienta mejor en unos lugares que en otros? Los economistas coinciden en que los cambios tecnológicos se propagan con mayor rapidez allí donde la gente intercambia sus puntos de vista de manera fácil y frecuente. Por eso la ciudad crece más que el campo. Pero se pierde la unanimidad de criterio cuando se trata de acotar el grado de concentración que deben tener las industrias para promover el crecimiento.

Se dividen en dos corrientes. Quienes opinan que las ciudades donde imperan los monopolios son las que crecerán y quienes sostienen que el futuro está en manos de las urbes donde existe una dura competencia entre muchas firmas.

Los que fían en los monopolios para el desarrollo de nuevas tecnologías cuentan con teóricos destacados (Alfred Marshall, Kenneth J. Arrow y Paul M. Romer). En su opinión, los innovadores temen que les copien los competidores y capitalicen sus ideas. Con el tiempo, los innovadores se cansan de mantener a sus competidores y deciden reducir sus esfuerzos de investigación. Pero si no hubiera tales competidores, los innovadores se preocuparían menos de los copiones y dedicarían más tiempo y dinero a la investigación. El predominio del monopolio generaría, así, más tecnología, que aportaría, a su vez, la energía para el crecimiento de la ciudad.

De ese razonamiento discrepa Michael E. Porter, catedrático de la Escuela de Administración de Negocios de Harvard. En su opinión, cuando un gran número de firmas fabrican productos similares en la misma zona geográfica, se despierta el estímulo por innovar. El espionaje industrial fomenta el intercambio de tecnología; las empresas que no aprovechen y mejoren las técnicas desarrolladas por otros, serán aplastadas por sus competidores.

Cuando Jacobs abordó la cuestión del crecimiento urbano, en los años sesenta, sus puntos de vista desentonaban de la corriente general. Por un lado, sostenía que la competencia promovía la difusión de la tecnología, pero afirmaba también, por otro, que las ciudades más robustas son las más diversificadas.

Según Jacobs, las técnicas importantes se desarrollan con la máxima rapidez cuando una idea tomada de una industria se trasplanta a otra. Citaba el ejemplo de los comerciantes de grano y algodón de la ciudad de Nueva York, que sintieron la necesidad de establecer acuerdos nacionales e internacionales y ello provocó la creación de la industria de servicios financieros.

Quizá porque Jacobs no presentaba modelos formales o pruebas cuantitativas de sus observaciones, su teoría quedó arrumbada. Scheinkman y sus colaboradores descubrieron casualmente su trabajo, cuando un colega les sugirió que leyesen el libro de Jacobs *The Economy of the Cities* (La economía de las ciudades), de 1969.

Para determinar qué ciudades han crecido y cuáles han bajado, Scheinkman y Shleifer compararon las tasas de empleo en el sector industrial, de 1956 y 1987, en 170 grandes áreas metropolitanas. Hallaron que las ciudades en declive tendían a la concentración; constituían, por lo común, centros industriales no competitivos del Medio Oeste, tales como Pittsburgh y Kenosha, en Wisconsin, donde el 60 por ciento de los empleos procedían de cuatro industrias. En Phoenix, una de las ciudades de crecimiento más rápido de su muestra, sólo un poco más del 20 por ciento de los empleos eran proporcionados por las cuatro grandes industrias.

Scheinkman y Shleifer extrajeron también otros rasgos que definían a unas y otras urbes. Las industrias que se concentraban en una ciudad con una fuerza mayor que en el promedio del país crecían despacio; por contra, si el tamaño medio de las empresas (basado en el número de empleados) era menor que el promedio nacional, la industria se expandía deprisa. Por último, las industrias que florecían estaban en ciudades donde las otras industrias dominantes eran relativamente pequeñas: al parecer, conviene convivir con vecinos muy distintos. "Los resultados, en conjunto, no son favorables a la teoría de Marshall-Arrow-Romer, a medias respecto a Porter y muy favorables a Jacobs", informan los economistas.

No todos comparten esas conclusiones. Abundan quienes ponen en duda que los datos respalden las ideas de Jacobs. Muchos estudios econométricos anteriores destacan la importancia de la concentración para las industrias. Y es preciso, además, distinguir entre situaciones de crecimiento estático, de mejora de los productos tradicionales, y situaciones de crecimiento dinámico, de desarrollo de innovaciones radicales.

¿Qué ocurrirá con Nueva York? Si atendemos a la vox pópuli, ha comenzado su declive. El crecimiento se estancó en los diez últimos años. Pero su tamaño enorme y su peculiar naturaleza podrían convertir a esa ciudad en un caso único ante cualquier tendencia.

Interferometría óptica de superficies

Basándose en la naturaleza ondulatoria de la luz y en la potencia de los ordenadores modernos, los autores han diseñado unos dispositivos sensibles capaces de medir la textura de las superficies

Glen M. Robinson, David M. Perry y Richard W. Peterson

Las cintas de vídeo, las bolas de los rodamientos, las películas fotográficas y las pastillas ("chips") de los ordenadores funcionan mal si sus superficies son ásperas o presentan irregularidades. Para obtener acabados de gran precisión, es necesario disponer de medios especiales capaces de medir la textura de la superficie. Hasta una fecha relativamente reciente, las técnicas utilizables tenían muchas limitaciones.

En 1980, nosotros pusimos a punto un método mucho mejor. La interferometría óptica, un fenómeno basado en la naturaleza ondulatoria de la luz, que permite acometer medidas precisas de las formas o de las distancias, parecía un candidato muy adecuado para alcanzar dicho objetivo. La interferometría proporciona una resolución extraordinaria y no requiere un contacto físico directo con la superficie sometida a estudio. Pero la interpretación de las imágenes interferométricas, o interferogramas, y su ligazón con las medidas significativas de la textura de las superficies revisten especial dificultad. Los interferogramas tradicionales consisten en un conjunto de instantáneas con zonas claras y oscuras que, en general, apenas se parecen a los contornos del objeto estudiado.

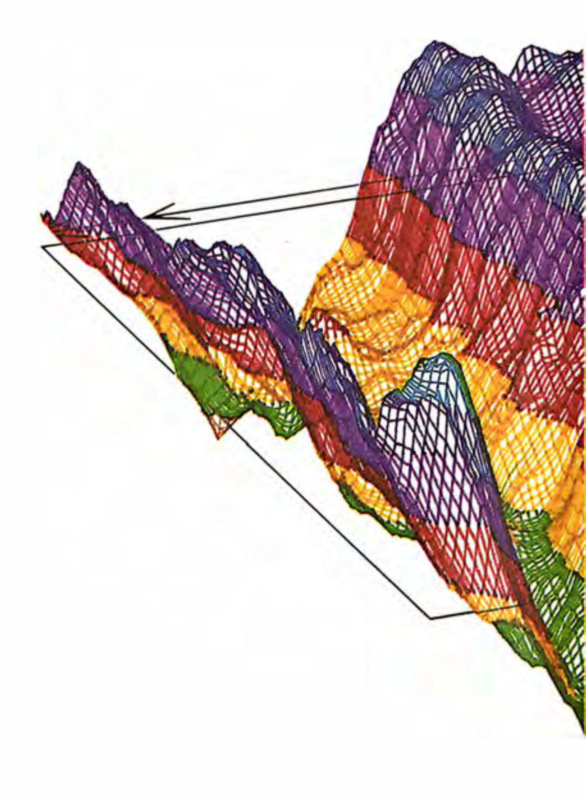
Así las cosas, se le ocurrió una solución del problema a uno de los autores (Robinson) mientras estaba viendo un programa de televisión en el que se mostraban unas imágenes tridimensionales, obtenidas por ordenador, de las capas de rocas situadas bajo un pozo de petróleo. Combinando adecuadamente la técnica de la interferometría con potentes ordenadores y programas avanzados de obtención de gráficos, descubrimos la posibilidad de presentar, de manera interesante e intuitiva, la ingente cantidad de información que existe en un interferograma. Por otra parte, una vez que toda la información contenida en un interferograma se ha introducido en el ordenador, podemos echar mano de técnicas matemáticas para deducir los datos estadísticos útiles que guarden relación con la textura de la superficie.

Estos métodos se han incorporado ya en algunos dispositivos comerciales. La interferometría se utiliza en ciertas aplicaciones de control de calidad y ha permitido reducir el coste y mejorar el funcionamiento de productos muy diversos, desde películas fotográficas hasta cintas magnéticas y disquettes.

La celeridad con que la industria ha incorporado la interferometría óptica analizada con ordenadores ha dejado al descubierto las limitaciones de los viejos métodos de medición. Por ejemplo, las técnicas tradicionales basadas en la difusión luminosa exponen la textura general de una superficie estudiando la forma en que ésta refleja la luz. Método que no nos dice nada acerca de los rasgos singulares de la superficie en cuestión, ni de su distribución acumulativa por tamaños. La microscopía óptica o electrónica, capaz de resolver pequeños detalles, no puede medir las alturas de las imperfecciones o protuberancias que existen en las superficies.

Otro método convencional, conocido con el nombre de rugosimetría, se basa en recorrer con una plumilla o punzón la superficie considerada.

GLEN M. ROBINSON, DAVID M. PERRY y RICHARD W. PETERSON han colaborado durante más de una década en el perfeccionamiento de las técnicas de interferometría asistidas por ordenador. Robinson se doctoró en química física por la Universidad de Tulane en 1970. Actualmente trabaja en la división de vídeo y audio de la compañía 3M. Perry, que se formó en la Universidad de Minnesota, enseñó matemáticas en el Seminario y Facultad de Bethel en St. Paul hasta 1982, año en que pasó a 3M, donde dirige el laboratorio de dispositivos de almacenamiento de datos. Peterson recibió en 1969 el grado de doctor en física por la Universidad estatal de Michigan, completando su formación en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Da clases en Bethel.



Las subidas y bajadas del punzón graban el relieve de la superficie en una cinta fina. Pero hay un inconveniente: la aplicación de la técnica exige aportar una presión bastante elevada sobre la punta del punzón, con el consiguiente riesgo de compresión y alteración de las superficies de las películas y cintas sometidas a examen.

En comparación con todos estos métodos, la interferometría óptica presenta importantes ventajas. Por única herramienta utiliza un haz de luz de baja intensidad; se trata, pues, de un proceso inocuo. En principio, la interferometría permite resolver las irregularidades de una superficie hasta un tamaño de varios angstroms. (Un angstrom es igual a la diez milmillonésima parte de un metro, diámetro aproximado de un átomo de hidrógeno). La técnica realiza, además, su trabajo fiable en brevísimo tiempo, porque el área observada es muy grande en relación con las dimensiones de los rasgos individuantes de la superficie.

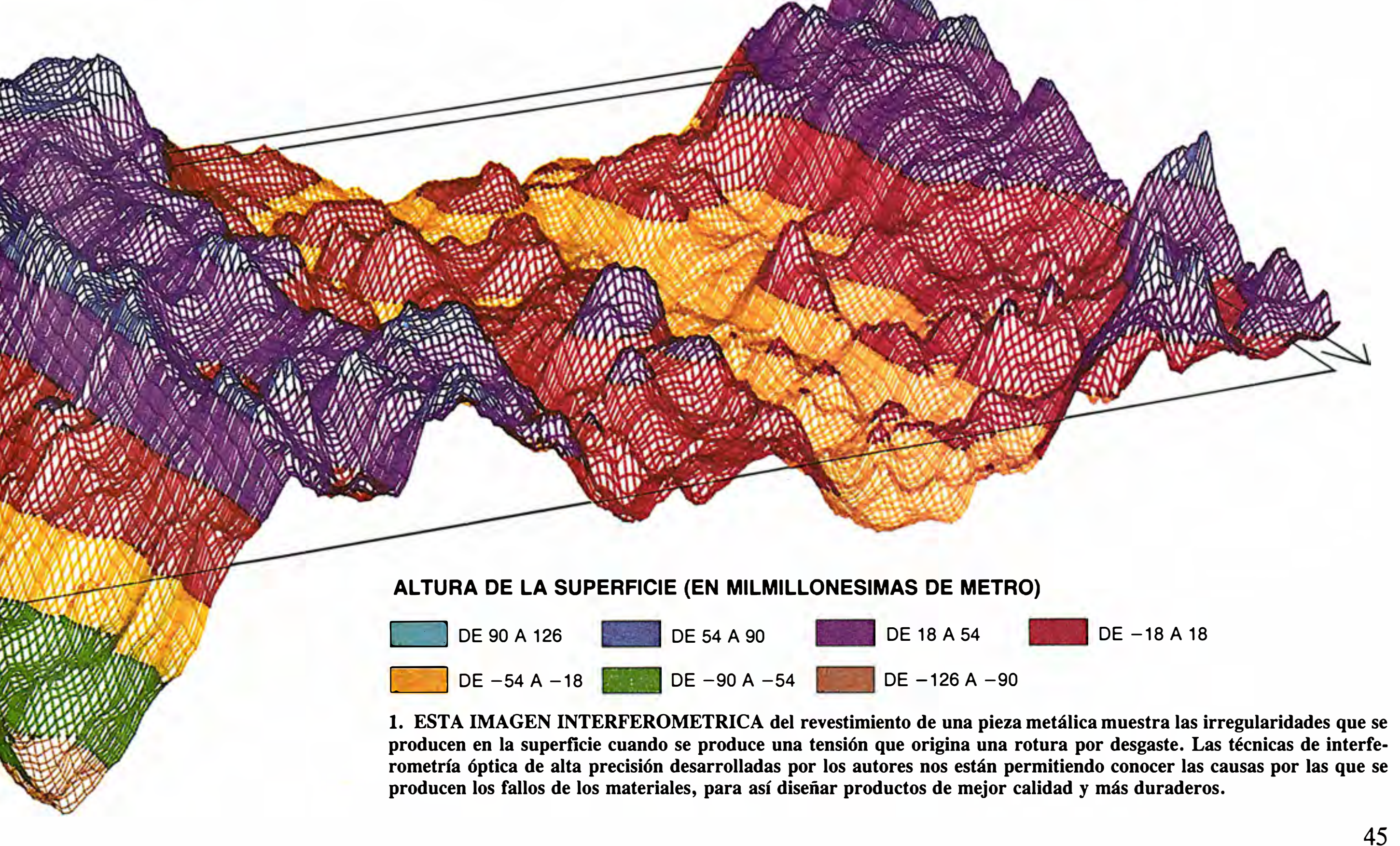
El principio fundamental de la interferometría consiste en la interacción o interferencia entre dos ondas luminosas que se encuentran una con otra, de forma parecida a lo que sucede cuando se encuentran dos ondas superficiales en el agua. En cualquiera de estos casos, cuando la cresta de una onda coincide con el valle de la otra, la interferencia es destructiva y las ondas se anulan. Cuando coinciden las dos crestas o los dos valles, las ondas se refuerzan mutuamente. Hace unos 100 años, Albert A. Michelson desarrolló las técnicas basadas en la interferometría y posibilitó con ello el medir distancias con suma precisión. El dispositivo desarrollado por este físico norteamericano, conocido con el nombre de interferómetro de Michelson, todavía se emplea.

El funcionamiento del interferómetro de Michelson está basado en el uso de una superficie parcialmente reflectora, o divisor del haz, que descompone un haz de luz monocromática (luz de un color o longitud de onda único) en dos haces, que se mueven en diferentes direcciones a lo largo de los brazos del instrumento. En nuestra aplicación, uno de estos haces se refleja sobre la superficie de un espejo plano de referencia; el otro haz se refleja en la superficie de la muestra sometida a estudio. Ambos haces vuelven a reunirse luego en el divisor.

La textura de la superficie de la muestra produce cambios en la distancia recorrida por el segundo haz. Cuando los haces se recombinan, algunas partes del segundo estarán en fase con el primero, mientras que otras estarán fuera de fase. En consecuencia, la relación espacial entre ambos haces poseerá una información minuciosa de la topografía de la superficie; esta información se manifiesta a través de regiones brillantes (allí donde los dos haces se refuerzan) y de regiones oscuras (allí donde se anulan) en el haz recombinado.

Cuando en la diferencia entre los caminos recorridos en los dos brazos del interferómetro se produce un cambio equivalente a una longitud de onda, la onda recombinada recorre un ciclo completo luz-oscuridad-luz. En virtud de ello, siempre que el camino recorrido a lo largo de un brazo aumenta o disminuye en una longitud de onda, se crea una nueva región o franja oscura.

Para explicar la relación espacial entre dos ondas, apelamos al ángulo de fase; si vale cero grados, significa que las dos ondas se mueven en fase y, por tanto, se refuerzan mutuamente. Cuando el ángulo de fase relativo es igual a 360 grados, la diferencia entre los caminos recorridos por uno y otro haz en los respectivos brazos es exactamente igual a una longitud de onda y, en consecuencia, se produce la creación de una nueva franja brillante.



1. ESTA IMAGEN INTERFEROMETRICA del revestimiento de una pieza metálica muestra las irregularidades que se producen en la superficie cuando se produce una tensión que origina una rotura por desgaste. Las técnicas de interferometría óptica de alta precisión desarrolladas por los autores nos están permitiendo conocer las causas por las que se producen los fallos de los materiales, para así diseñar productos de mejor calidad y más duraderos.

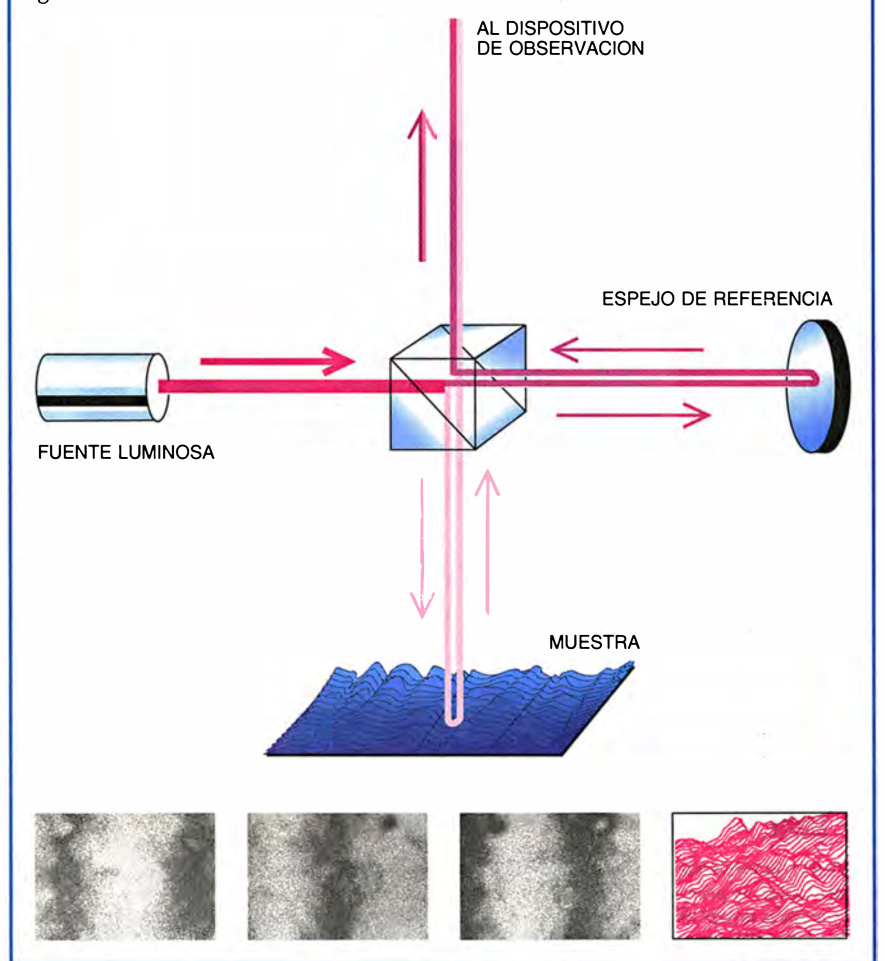
Cuando el espejo de referencia se inclina un tanto, la diferencia entre los caminos recorridos a lo largo de la imagen cambia de forma regular y continua. Se genera así una serie regular de franjas de interferencia paralelas. Las irregularidades existentes en la superficie de la muestra alteran manifiestamente ese patrón de bandas. Por ejemplo, si la muestra presenta una protuberancia cuya altura es igual a media longitud de onda, las franjas se desplazan en un ciclo (360 grados), debido a que el correspondiente recorrido disminuye en una longitud de onda. Las figuras de franjas reproducen las elevaciones de la superficie de forma parecida a como lo hacen las líneas de nivel en un mapa topográfico. El intervalo entre bandas viene determinado, a la vez, por la pendiente de la superficie de la muestra y por la inclinación del espejo de referencia.

Así procede la interferometría

Se produce interferencia de la luz cuando dos ondas o conjuntos de ondas interaccionan entre sí. En el interferómetro de Michelson, un haz de láser incide sobre un espejo semiplateado, que descompone dicho haz en dos; uno se refleja en la muestra y el otro se refleja en un espejo de referencia. Cuando estos dos haces se recombinan, las ondas presentan cierta diferencia de fase y se eliminan total o parcialmente.

Las figuras de interferencia o interferogramas (*fila de abajo*) se caracterizan por la repetición de unas imágenes de oscuridad-luz-oscuridad, conocidas como bandas de interferencia. Las crestas y valles de la superficie de la muestra observada producen un cambio en el camino recorrido por el primero de los haces citados anteriormente, alterando la relación espacial entre los dos haces y la forma de dichas franjas. Las bandas se distorsionan con los accidentes de la superficie de la muestra, obteniéndose unas figuras parecidas a las líneas de nivel de los mapas topográficos.

El tratamiento de estas figuras de interferometría mediante un ordenador se basa en la obtención de tres interferogramas diferentes de la muestra (en este caso, una cinta de vídeo muy rugosa). Cuando la muestra se mueve la distancia recorrida por el primer haz varía y las fases del haz recombinado cambian. El brillo variable en cada punto del interferograma se analiza con el fin de poner de manifiesto la fase de la onda y, en consecuencia, la altura de la superficie de cada punto de la muestra. Toda esta información se representa en una imagen tridimensional.



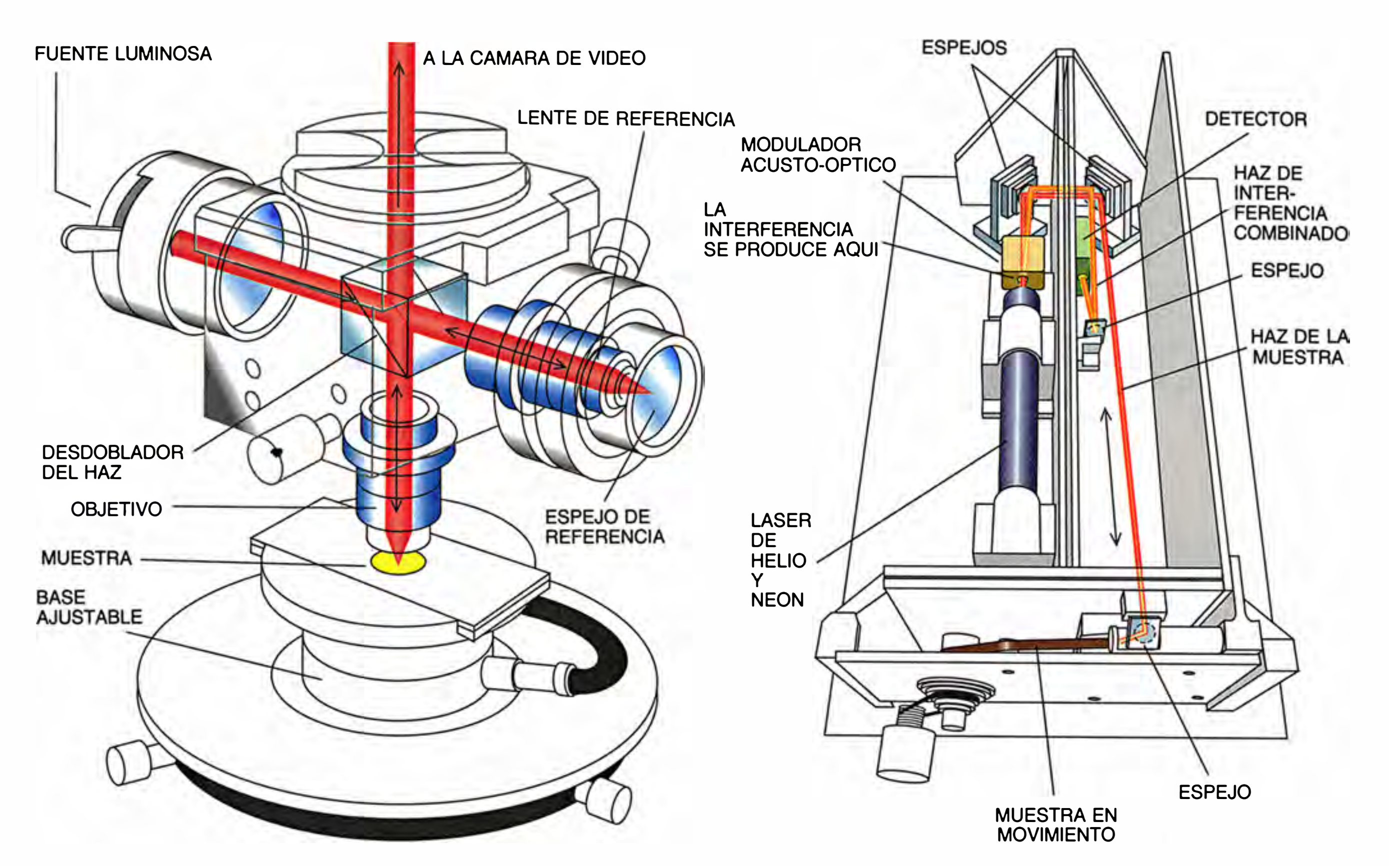
La medición manual de cada uno de los cambios acontecidos en las franjas de un interferograma típico produce fácilmente un total de 10.000 datos. El procesamiento de semejante avalancha de datos requiere el auxilio de un ordenador. De ahí que antaño las aplicaciones de la interferometría microscópica se limitaran, por lo común, a problemas en dos dimensiones bien definidos: cálculo de espesores o profundidad de depósitos o arañazos aislados.

Dos avances han hecho posible la realización de estudios interferométricos rápidos y adecuados. El primero, la disponibilidad de ordenadores digitales de alta velocidad y alta capacidad. El segundo adelanto lo aportó, en 1974, John H. Bruning, de los laboratorios AT&T Bell, con la creación de un proceso al que denominó interferometría de detección de fase directa.

La técnica desarrollada por Bruning exige medir tres o más figuras de interferencia, cada una de las cuales está asociada con una posición vertical, algo distinta, del espejo de referencia o de la muestra. Todas estas posiciones difieren entre sí a lo sumo en una longitud de onda (360 grados de fase). Bruning observó que el conjunto de estas tres figuras encerraba la información necesaria para determinar la diferencia de fase entre el haz de referencia y el haz de la muestra, para todos los puntos de la superficie de la muestra. La aplicación de las adecuadas ecuaciones trigonométricas a las tres figuras de luz y oscuridad nos da una lectura precisa de las fases de las ondas a lo largo de toda la superficie de la muestra. Partiendo de esta información, podemos deducir cuál es la topografía de la superficie que ha producido las fases observadas.

La medición de las fases relativas de los haces de referencia y de la muestra proporciona una sensibilidad mucho mayor que la del viejo método de medida del desplazamiento de las franjas de interferencia del haz reconstruido. El método de Bruning aporta, además, una visión uniforme de la superficie de la muestra, facilitando la automatización del proceso de medida.

A lo largo de esta última década, hemos diseñado, construido y perfeccionado dos tipos de dispositivos para llevar a cabo interferometrías directas con detección de la fase. Hemos realizado nuestro trabajo en



2. EL INTERFEROMETRO DE MICROSCOPIO viene a ser el interferómetro de Michelson dotado con lentes de aumento y con una placa ajustable para colocar la muestra a observar. Una cámara de vídeo recoge la figura de interferencia obtenida para tres posiciones de la muestra diferentes y la convierte en un conjunto de datos digitales. Mediante un programa de ordenador se reconstruye una imagen tridimensional de la superficie de la muestra a partir de dichos datos.

3. EL INTERFEROMETRO DE BARRIDO POR LASER dirige un haz de láser focalizado sobre una muestra en movimiento. Un modulador cambia la frecuencia del haz de la muestra, originando una figura de interferencia regular cuando dicho haz se recombina con el haz emergente. Las crestas y valles existentes en la muestra producen cambios en la longitud recorrida por el haz, alterando las condiciones de interferencia y poniendo de manifiesto las características de la topografía de la superficie.

la compañía 3M y en el departamento de física del Seminario Mayor Universitario de Bethel en St. Paul, Minnesota. Uno de estos sistemas, basado en la técnica de Bruning, emplea un interferómetro de Michelson o similar en conexión con un microscopio óptico con el fin de obtener imágenes tridimensionales de las superficies. El otro sistema, más innovador, mide el perfil bidimensional de la superficie de una muestra que se mueve deprisa bajo un haz de láser focalizado.

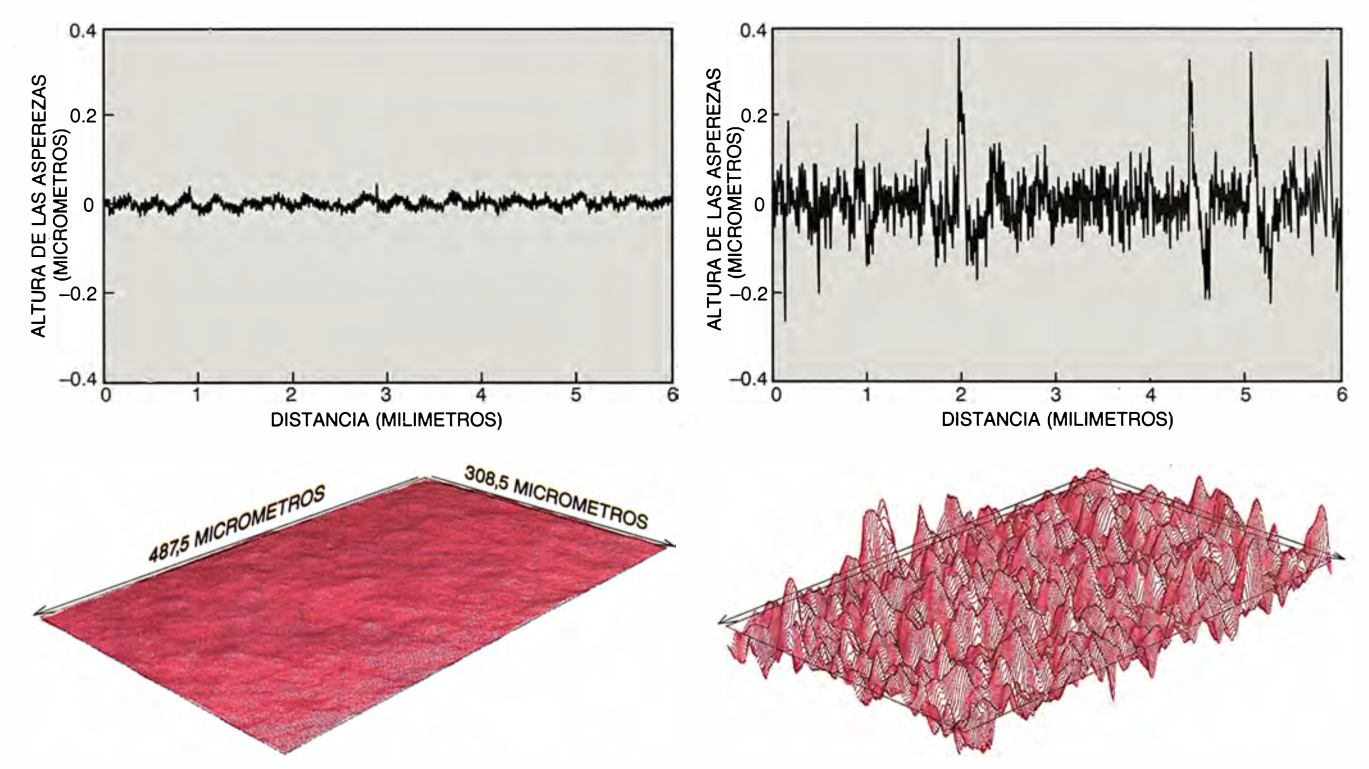
En el primero de estos dispositivos, el microscopio óptico proporciona un aumento de la figura de interferencia producida por el interferómetro. Una cámara de vídeo registra esta imagen aumentada, la convierte a una forma digitalizada y la almacena en un ordenador. El proceso de digitalización divide la imagen en un reticulado. Cada una de las celdas de este reticulado define un elemento de imagen o píxel. Estos píxeles constituyen las partes más pequeñas de la imagen interferométrica, de modo parecido a lo que sucede con los puntos que forman las fotografías que se reproducen en los periódicos.

Moviendo la muestra o el espejo de referencia, alteramos la fase en cada uno de los píxeles que constituyen la imagen interferométrica. En el método de Bruning ordinario en tres fases, este proceso se repite dos veces con el fin de recoger tres imágenes de interferencia. Siempre que la muestra se mueve un octavo de longitud de onda, la longitud recorrida cambia en un cuarto de longitud de onda y la fase se desplaza 90 grados. En cada píxel de la imagen de interferencia, la fase dependerá de la distancia recorrida por el haz de luz, distancia que viene condicionada por la textura de la superficie y por el movimiento neto de la muestra.

Los interferómetros de barrido por láser detectan la fase de las ondas en función del tiempo. Con algunos prototipos primitivos se pretendía medir los cambios rápidos que experimentan los plasmas termonucleares. En nuestros instrumentos basados en esta técnica, se dirige un haz láser hacia un objeto en movimiento: la bobina de una cinta magnética o el disquette de un ordenador en rotación. De forma análoga a lo que sucede en los dispositivos basados en los microscopios, las medidas de la fase se llevan a cabo desdoblando y recombinando el haz.

El proceso de interferometría de barrido por láser se inicia con un haz emitido por un láser de helio y neón, que radia luz con una longitud de onda de 6328 angstroms. En este caso, resulta más conveniente considerar la frecuencia de la luz, es decir, el número de ciclos de ondas que se producen cada segundo. Una longitud de onda de 6328 angstroms corresponde a una frecuencia de 474.100.000 megahertz (un megahertz es igual a un millón de ciclos por segundo).

El haz procedente del láser atraviesa un modulador óptico-acústico, es decir, un dispositivo capaz de alterar la frecuencia de la luz. La frecuencia del haz emergente está desplazada 40 megahertz. Se provoca que el haz, fuertemente focalizado, incida sobre la muestra en movimiento. Tras ser reflejado por la superficie de la muestra, el haz de láser recorre de nuevo su camino original, vuelve a atravesar el modulador y sufre otro desplazamiento de 40 megahertz. Finalmente, el haz se refleja en el espejo de salida



4. LAS CINTAS MAGNETICAS han de poseer una lisura finísima si queremos que funcionen bien. La interferometría permite medir, con facilidad y rapidez, la textura de la superficie de las cintas. Representamos dos perfiles típicos de esta clase de superficies cuando se miden mediante un interferómetro de barrido por láser (*arriba*) y un dispositivo basado en un microscopio (*abajo*). Los instrumentos de barrido por láser proporcionan figuras alargadas de los perfiles bidemensionales de la superficie, que resultan útiles para conocer el espesor medio del revestimiento magnético de la cinta. Los interferómetros microscópicos crean imágenes tridimensionales de dicha superficie que, evidentemente, son más intuitivas.

del láser, donde se recombina con la luz sin desplazar que emerge de dicho láser.

Los dos pases a través del modulador alteran la frecuencia de la luz de láser en 80 megahertz respecto a su frecuencia original. Cuando se recombina con el haz original, la luz desplazada produce un "latido" de frecuencia en las franjas de interferencia de 80 megahertz. Los dos haces se encuentran en mutua fase y desfase 80 millones de veces cada segundo; por tanto, la intensidad de la luz (brillo) en cada punto del detector aumenta y disminuye 80 millones de veces cada segundo. La presencia de irregularidades en la superficie de la muestra modifica la longitud del recorrido del haz de láser reflejado por ella y, en consecuencia, el tiempo invertido en dicho recorrido. Este hecho se traduce en un cambio constante de la fase que se superpone al ritmo regular de las interferencias, conforme vamos moviendo la muestra bajo el haz de láser. Un detector electrónico mide rápidamente dicha fase y transporta la información correspondiente hacia un microprocesador; allí se analiza y crea el perfil bidimensional de la superficie en movimiento.

En uno nuestros interferómetros laséricos, conformamos las muestras, cintas de vídeo por ejemplo, en una suerte de bucles de unos 50 centímetros de longitud; se deslizan luego sobre una guía perfectamente pulimentada que está situada en el foco del haz de láser. Los disquettes y otros objetos planos se mueven bajo el haz de láser sobre una mesa giratoria de que dispone otra versión del interferómetro de láser, que barre una superficie de unos 50 centímetros de longitud y un micrometro de anchura. Las muestras pasan bajo el haz de láser focalizado con una velocidad de unos 15 o 20 centímetros por segundo.

Los dos tipos de interferómetros de detección directa de fase son capaces de resolver los detalles de la superficie observada con un tamaño inferior a unos 10 angstroms de altura, lo cual representa una precisión unas 30 veces mayor que la que se consigue mediante técnicas interferométricas clásicas. El interferómetro microscópico diseñado para aumentar la imagen de la muestra unas 400 veces alcanza una resolución espacial del orden del micrometro y obtiene imágenes de 125 por 200 micrometros. Cuando la amplificación disminuye, decae el poder de resolución y aumenta la superficie rastreada.

En un interferómetro de barrido por láser, la resolución espacial depende de la distancia entre los puntos de los datos, que, a su vez, depende de la velocidad con que la muestra pasa bajo el haz y de la velocidad con que se produce la recogida de datos o velocidad de muestreo. (En última instancia, la resolución de ambos tipos de interferometría viene limitada por el fenómeno de la difracción, una consecuencia de la naturaleza ondulatoria de la luz.) Un valor típico de la distancia entre los puntos de los datos es de 1,6 micrometros.

Para la mayoría de las muestras observadas (por ejemplo, para las cintas de vídeo), los detalles de interés que aparecen en la superficie vienen a poseer unos 10 micrometros de diámetro; los dos interferómetros proporcionan resultados comparables y complementarios. Si el tamaño de los rasgos supera en mucho ese valor, el interferómetro de barrido por láser logra una medición mejor de la rugosidad, dada su capacidad de rastrear una región más extensa.

En la recogida de los tres interferogramas que se necesitan en el interferómetro microscópico se tarda unos dos segundos, el mismo tiempo que supone la medida del perfil de una superficie con el interferómetro de observación de láser. El ordenador invierte unos dos minutos en analizar la superficie estudiada a partir de los datos recogidos.

Procesados los datos, hay que compensar los errores en las fases. Estos

errores se producen cuando la topografía de una superficie sube o baja con tal pendiente, que la longitud de los recorridos de la luz cambia en una cuantía mayor que media longitud de onda (180 grados) entre dos observaciones. Se producen también errores cuando la brusquedad de la protuberancia impide que la luz se refleje en las lentes del dispositivo de barrido. En tales casos, el ordenador busca la fase perdida, debido a que dicha fase se repite en cada ciclo. (Por ejemplo, al ordenador le parece que la cresta de una onda es exactamente la misma que la cresta siguiente.)

El hecho de que la superficie que es capaz de visualizar el interferómetro microscópico sea bastante grande resulta ventajoso para proceder a las correcciones de los errores en la fase. Los algoritmos utilizados por el ordenador permiten detectar automáticamente los datos medidos incorrectamente y examinar las zonas de rastreo adyacentes para proceder a las oportunas comparaciones. Estos dispositivos permiten corregir los errores de la fase sin perder ninguna parte de las imágenes. La corrección de los errores de la fase con el interferómetro de barrido por láser resulta mucho más difícil, debido a que el haz examina sólo una zona muy estrecha de la superficie, sin que aporte información acerca del área que rodea a dicha zona y que podría servir de referencia.

Los datos que proporcionan los interferómetros microscópicos deben cribarse también en lo concerniente a la curvatura de las imágenes, circunstancia ésta que podría obedecer a un montaje inadecuado, una curvatura inherente de la muestra o la existencia de aberraciones en el sistema óptico. El cálculo de dicha curvatura se lleva a cabo aplicando las técnicas estadísticas adecuadas para permitir un redondeo de los datos, de forma tal que la curvatura en cuestión se pueda eliminar matemáticamente (por sustracción) y dejar aflorar sólo la textura de la superficie por la que estamos interesados. Para terminar, los datos corregidos se representan en una forma tridimensional.

Al estar generadas por ordenador, las imágenes interferométricas pueden doblarse, girarse o invertirse. Con la ayuda de un programa especial para gráficos se puede exagerar el relieve vertical de las imágenes obtenidas o utilizar colores que realcen las características topográficas. Ese soporte informático permite también simular una visión lateral en ángulo, que aporte una perspectiva familiar y fácilmente comprensible. En comparación con todas estas posibilidades, las fotografías de microscopía óptica y electrónica sólo pueden visualizarse en una dirección vertical, que suele resultar poco natural.

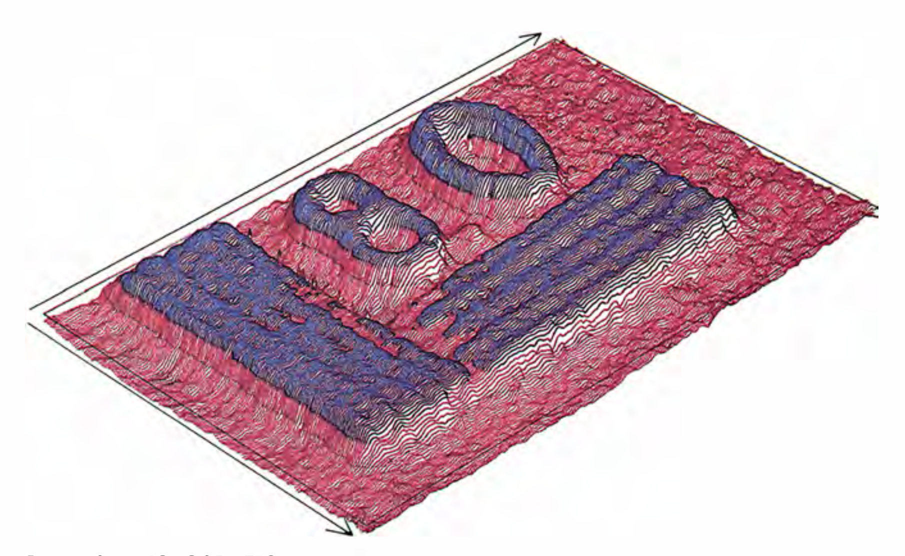
Los ordenadores calculan la altura, la profundidad o el volumen de cualquier detalle de la superficie que el interferómetro haya detectado. Por otra parte, la topografía general de dicha superficie, dentro de la zona captada en la imagen procesada, puede analizarse con los métodos matemáticos tradicionales. Así, para representar el número de irregularidades de la superficie en función de su tamaño, el histograma nos ofrece una información muy valiosa acerca de la forma en que la textura de la superficie de una muestra determinada afectará a su comportamiento. La altura media de estas irregularidades y la desviación típica de dichas alturas son otros elementos útiles.

Los datos de salida del interferómetro de barrido por láser se someten a un proceso similar. Una vez eliminados los errores de la fase, el perfil de la superficie consiste en una serie de componentes que varían pausadamente (frecuencias bajas) y otra serie de componentes que muestran variaciones más rápidas (frecuencias elevadas). Para muestras lisas, tales como las cintas de vídeo, las componentes de frecuencias elevadas encierran la mayor parte de la información útil. Las frecuencias bajas corresponden sobre todo al ruido propio de la instrumentación, a la presencia de vibraciones y a los cambios de carácter general en el espesor de la muestra. Los algoritmos utilizados por el ordenador filtran bien las componentes indeseadas. En el caso de las cintas magnéticas, las componentes de frecuencias bajas sí podrían importar, porque reflejan las variaciones de espesor de los revestimientos magnéticos.

Los perfiles lineales de las superficies creados con los interferómetros de barrido por láser son más difíciles de interpretar que las imágenes gráficas que proporcionan los dispositivos interferométricos basados en microscopios, que resultan mucho más intuitivas y estéticamente más atractivas. Las técnicas estadísticas condensan los perfiles obtenidos y permiten presentarlos en una forma más comprensible y útil. Estos métodos permiten también medir el tamaño y la periodicidad de figuras superficiales repetidas. El análisis estadístico suele a veces revelar rasgos reiterados en la superficie, allí donde las imágenes interferométricas de perfil o tridimensionales se limitan a sugerir un orden aleatorio.

Otros investigadores han desarrollado interferómetros alternativos a los que acabamos de estudiar. Frank E. Talke, de la Universidad de California en San Diego, y David B. Bogy, de Berkeley, han construido un interferómetro de láser que examina los corrimientos que experimenta la frecuencia de la luz lasérica. Están concentrados en el estudio de los movimientos de los cabezales de grabación y reproducción de los ordenadores, que se producen por culpa de las irregularidades de las superficies de los discos en rapidísima rotación. James C. Wyant y Chris L. Koliopoulos, de la Universidad de Arizona, han desarrollado otros interferómetros similares al nuestro de microscopio.

Gracias a sus excepcionales pres-



5. IMAGEN FOTOGRAFICA de una placa de control, examinada con un interferómetro microscópico. La topografía de la película pone de manifiesto la densidad óptica de la imagen: la superficie se eleva allí donde la imagen es más oscura. Estudiando la textura de la superficie de diferentes clases de películas se puede analizar lo que darán de sí en cuanto a poder de resolución.

taciones, la interferometría directa de detección de fase no ha tardado en traspasar las paredes del laboratorio para situarse en el mercado. Varias empresas han aprovechado la investigación universitaria y comercializan ya interferómetros de detección de fase en dos y tres dimensiones; otra vende un interferómetro de barrido por láser basado en un principio diferente al descrito en este artículo.

En la empresa 3M, la técnica de fase directa se utiliza para caracterizar las superficies de productos de grabación magnéticos, láminas de plástico, cabezales de grabación y piezas de maquinaria de precisión. Pero hemos abordado un abanico más amplio de aplicaciones: películas fotográficas, cintas adhesivas, ceras sobre losetas de pavimentos cerámicos, cilindros de calandria industriales (utilizados para presionar materiales y obtener láminas delgadas), lentes y espejos e incluso empastes dentales.

En particular, la interferometría de detección de fase ha desempeñado un papel destacado en la mejora del diseño y fabricación de cintas magnéticas. Las experiencias demuestran que el funcionamiento de una cinta de grabación de vídeo depende muy estrechamente de la rugosidad de la superficie de la cinta. Los interferómetros de barrido por láser pueden detectar variaciones muy pequeñas en el espesor de los revestimientos magnéticos; su capacidad de rápido registro de los datos correspondientes, sin que exista un contacto físico y de forma no destructiva, nos permite controlar automáticamente, con gran facilidad y de forma continua, las características de las cintas fabricadas. Gracias a la interferometría, el coste de fabricación de los videocasetes, disquettes y otros artículos similares de grabación ha caído sustancialmente, en tanto que mejoraban el funcionamiento y la calidad del producto.

Para averiguar si se producen mermas o desgastes en el material de revestimiento de los disquettes o de las bolas de rodamientos es necesario desarrollar versiones mejoradas de estos dispositivos. Desgraciadamente, la magnitud del desgaste suele ser pequeñísima y local, incluso en el caso de que se produzcan fallos en el funcionamiento de estos productos. Las técnicas de interferometría han refinado el proceso de medición de la tasa de desgaste y del volumen afectado, amén de acotar con mayor precisión los mecanismos responsables de esas pérdidas.

En las películas fotográficas reveladas, la topografía de la superficie guarda relación directa con la densidad óptica de la imagen (es decir, el ennegrecimiento de la película). Las técnicas de interferometría determinan la definición de las imágenes fotográficas midiendo las pendientes de la topografía de la superficie de dichas imágenes. Esta información resulta muy valiosa para desarrollar nuevos tipos de películas.

El advenimiento de la interferometría de detección directa de fase ha convertido en tarea rutinaria la medición de la textura de la superficie de las películas de poliéster, material que se utiliza como soporte en múltiples aplicaciones (cintas adhesivas, revestimientos que simulan el aspecto de las maderas, cintas magnéticas y películas fotográficas). Una de las caras de la película de poliéster suele aparecer granulosa, para facilitar su desprendimiento de los grandes rollos de almacenamiento en que se presenta; la otra, suavísima, para cumplir su misión de soporte. Antes del desarrollo de esta técnica, resultaba difícil determinar el grado de textura que presentaba este material. Las técnicas interferométricas permiten ya un mejor control de la textura superficial de las láminas de poliéster, con las consecuencias positivas que ello acarrea para productos de alta calidad. Por último, y merced al avance extraordinario de los programas de gráficos, se recurre a la interferometría óptica para levantar mapas de alta resolución de las superficies en dos y tres dimensiones. Si ése es su presente, el futuro no puede presentarse más halagüeño.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIGITAL WAVEFRONT MEASURING INTERFEROMETER FOR TESTING OPTICAL SURFACES AND LENSES. J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White y D. J. Brangaccio en *Applied Optics*, vol. 13, n.º 11, págs. 2693-2703; noviembre de 1974.

INTERFEROMETRIC MEASUREMENTS OF THE SURFACE PROFILE OF MOVING SAMPLES. R. W. Peterson, G. M. Robinson, R. A. Carlsen, C. D. Englund, P. J. Moran y W. M. Wirth en *Applied Optics*, vol. 23, n.º 10, págs. 1464-1466; 15 de mayo de 1984.

THREE-DIMENSIONAL SURFACE METROLOGY OF MAGNETIC RECORDING MATERIALS THROUGH DIRECT-PHASE-DETECTING MICROSCOPIC INTERFEROMETRY. D. M. Perry, P. J. Moran y G. M. Robinson en *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, vol. 55, n.º 4, págs 145-150; abril de 1985.

Control biológico de malas hierbas

El enfoque biológico en la protección del campo está cosechando buenos frutos. Insectos y microorganismos se cuentan ya entre los herbicidas comerciales

Gary A. Strobel

El hombre ha luchado contra las malas hierbas desde los mismos inicios de la agricultura. El libro del *Génesis* (3, 18) remonta esa lucha al propio Adán; en una de las referencias más antiguas a las plantas nocivas, se le prometen espinas y abrojos en su, por otra parte, perfecto Edén.

Echar a perder los jardines es uno de los efectos más suaves de las malas hierbas (es decir, de cualesquiera plantas que medran allí donde no son deseadas). Obstruyen también los cursos de agua, destruyen hábitats de vida salvaje e impiden el laboreo de las tierras. Su expansión desenfrenada elimina áreas de pastoreo y supone un tercio de todas las pérdidas de cosechas en el mundo, un derroche que la creciente población humana no puede permitirse. Las plantas cultivadas y otras deseables para el hombre pueden morir porque las intrusas compiten por agua, nutrientes y luz o se interponen a la irrigación. La recolección puede verse, a su vez, dificultada.

La necesidad global de un control de las malas hierbas ha encontrado respuesta en la industria química, con herbicidas eficaces para la agricultura. Pero algunos plantean graves problemas, en particular si se emplean mal; nos referimos a los compuestos tóxicos y dañinos que amenazan la vida animal y la salud pública cuando se acumulan en las plantas nutricias, las aguas freáticas y el agua potable, sin olvidar el riesgo que puedan correr los propios trabajadores que los manipulan.

En los últimos años, la industria ha introducido herbicidas que son más seguros, desde el punto de vista ecológico, que los de antaño, en especial el glifosato, producido por Monsanto, y las sulfonilureas, desarrolladas por Du Pont. Pero los nuevos productos químicos, por sí solos, no van a resolver los problemas de malas hierbas en todo el mundo. De ahí que los fitopatólogos, incluido mi grupo de la Universidad estatal de Montana, estén explorando alternativas biológicas que aprovechen el poder innato que tienen ciertos organismos, en particular insectos y microorganismos, de eliminar las hierbas dañinas.

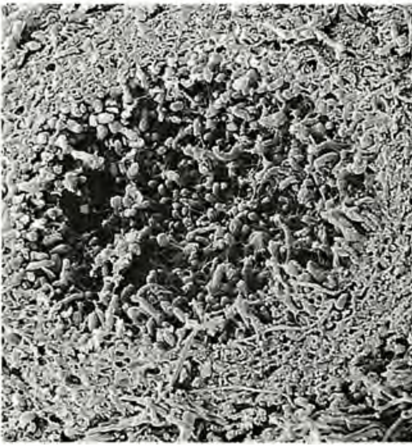
Los agentes biológicos en uso no perjudican el medio; muchos ofrecen incluso el beneficio añadido de la especificidad. Por lo general pueden escogerse por su capacidad de atacar a objetivos prefijados, sin que atenten contra las plantas cultivadas u otras (aunque estén relacionadas con las malas hierbas a las que va destinado el herbicida). En cambio, ciertas sustancias químicas acaban con todas las plantas con las que entran en contacto, salvo las especies que poseen resistencia natural, o inducida por manipulación genética, a esos compuestos. Además, pueden administrarse varios agentes biológicos una sola vez, sin preocuparse de aplicaciones adicionales; es normal, por contra, la aplicación reiterada de los productos químicos durante una estación de crecimiento.

Puede que los métodos biológicos no suplanten nunca enteramente a los herbicidas químicos, pero ayudarán a limitar el empleo de éstos y reducir los riesgos que conllevan. Quizá dobleguen la resistencia que ciertas malas hierbas oponen a los herbicidas convencionales.

El hombre constituye el agente de control original de cizaña. Durante miles de años ha estado arrancando,

GARY A. STROBEL está al frente de la cátedra Richard Gray de fitopatología en la Universidad estatal de Montana. También es director del "programa experimental para estimular la investigación competitiva", un proyecto patrocinado por la Fundación Nacional de Ciencia para mejorar la financiación en los estados que reciben escaso apoyo federal para la investigación.





1. HOJA DECOLORADA de juncia púrpura *(Cyperus rotundus)*; el ataque es obra de un hongo, *Ascochyta cypericola*, uno de los muchos her-

cortando, desbrozando, acuchillando y abriéndose camino a través de terreno infestado por malas hierbas, con resultados desiguales.

La primera introducción con éxito de un agente biológico no humano tuvo lugar a mediados del siglo XIX. Por aquel entonces, el nopal *Opuntia vulgaris,* una forma de chumbera originaria de las Américas, se había convertido en una pesadilla para la India. Pudo ser controlado mediante la liberación del insecto *Dactylopius ceylonicus,* un enemigo natural de la planta.

Desde entonces, se ha recurrido a los insectos para limitar la proliferación de más de 30 especies dañinas en distintas partes del globo. Trabajo que ha facilitado el camino para la experimentación con microorganismos que matan las malas hierbas o debilitan su acción. De estos agentes patógenos hay varios ya en el mercado o se aprestan a entrar en él; muchos laboratorios prosiguen investigando las posibilidades de múltiples más. La mayoría de los microbios sometidos a estudio son hongos, los patógenos vegetales más comunes; algunos grupos de trabajo, sin embargo, se centran en virus vegetales, bacterias y nemátodos.

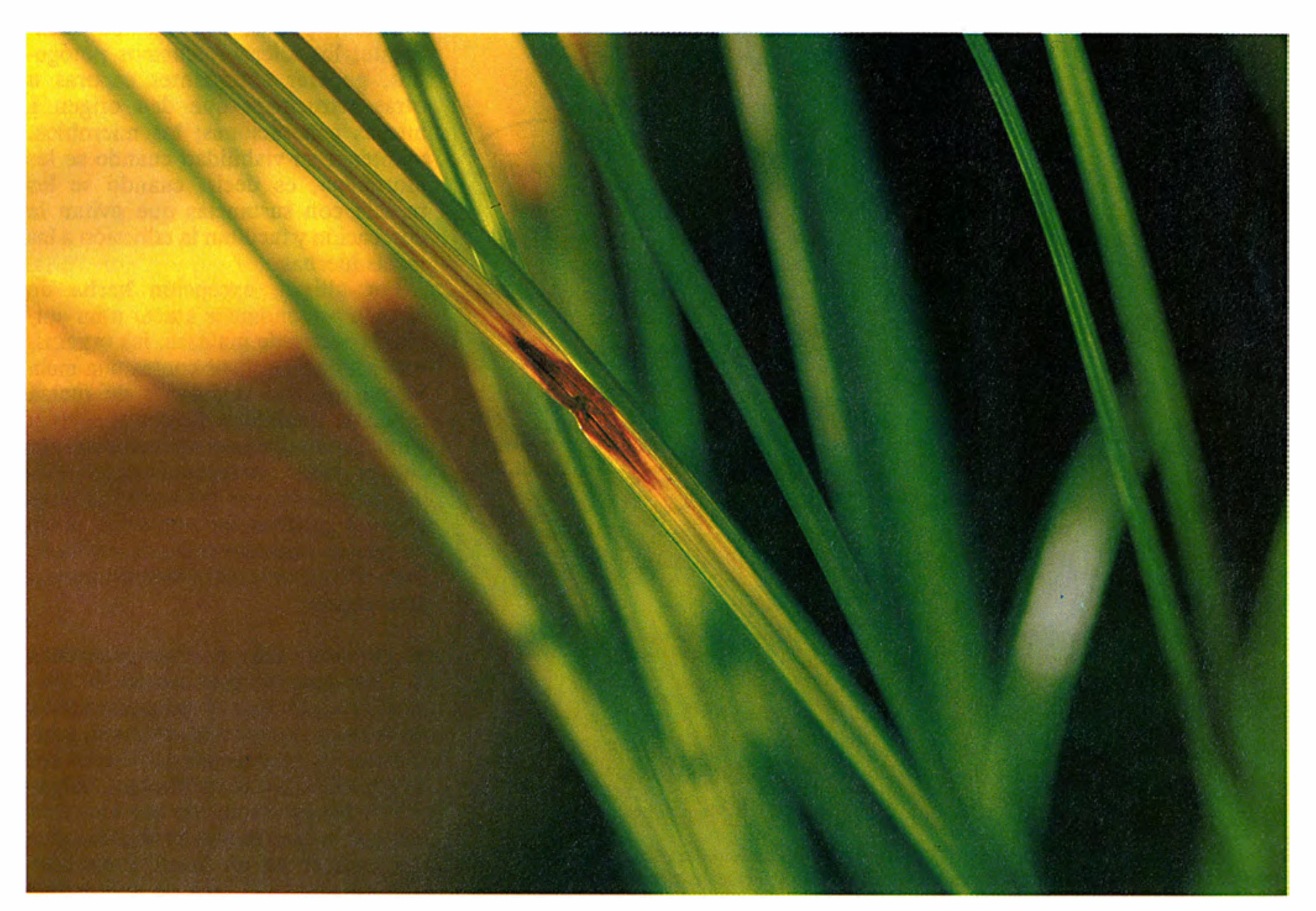
Para desarrollar medidas de biocontrol, se empieza por investigar la biología de la especie objetivo, sus enemigos naturales y su ciclo de desarrollo, con el fin de suministrar así los enemigos más potentes en el momento del ciclo en el que los agentes alcanzan una mayor eficacia destructora.

La industria química, por su lado, investiga en herbicidas de rendimiento máximo, compuestos que bloqueen determinados procesos químicos de las malas hierbas seleccionadas. En el pasado, muchos herbicidas nacieron de verdaderas chapuzas: los químicos creaban compuestos nuevos sin pensar en ningún blanco bioquímico; después, ensayaban los compuestos con una serie de plantas.

La búsqueda de enemigos comienza con una revisión de la bibliografía sobre la mala hierba, sin dejar de lado la exploración de campos en busca de antagonistas desconocidos. La caza empieza en el hogar original de la cizaña, porque sus enemigos tienden a mostrarse allí más enérgicos. Muchas plantas que emponzoñan un lugar son inocuas en su centro de origen, por la sencilla razón de que otros organismos en la misma región impiden su propagación.

Por ejemplo, las expediciones a los lugares de origen han descubierto agentes biológicos prometedores contra la juncia púrpura *(Cyperus rotundus)*, una planta parecida a una hierba que produce flores de color de lavándula. Después de escapar de la India empezó a infiltrarse en los cultivos de las regiones tropicales de todo el globo. Se trata de una planta persistente, sin características que la rediman. Está considerada la peor del mundo.

Los ejemplos abundan: la avena silvestre *(Avena fatua)*, que se extendió desde el Oriente Medio a las demás regiones cerealistas del mundo; el sorgo *(Sorghum halepense)*, una exportación mediterránea que significa la ruina para las cosechas de sorgo *(Sorghum vulgare)* y de maíz en la mayoría de regiones agrícolas; la marihuana *(Cannabis sativa)*, nativa de



bicidas biológicos en potencia. El hongo prolifera en la mala hierba mediante la generación de picnidios *(cuerpos redondeados en la micrografía electrónica de barrido superior de la izquierda)*, cada uno de los cuales contiene esporas *(extremos engrosados de los filamentos de la sección)*. Los picnidios están micrografiados a 31 aumentos; las esporas, a 305. Wilford Hess, de la Universidad Brigham Young, realizó las micrografías.

Asia templada, y pesadillas acuáticas tan extendidas como el jacinto de agua *(Eichhornia crassipes)*, que se originó en Sudamérica. En cada caso, la exportación accidental o mal aconsejada de estas plantas ha costado cientos de millones de pesetas en pérdidas de cosechas, en medidas de control, o en ambas cosas.

Ya sea en el hogar inicial de una planta o en el adoptivo, los investigadores identifican agentes potenciales de biocontrol buscando plantas diana que exhiban síntomas de enfermedad o de infestación por insectos. Síntomas comunes son hojas amarillentas o moribundas, partes florales en putrefacción, raíces descompuestas o tallos dañados (en el caso de infección) o la presencia de huevos o de los propios insectos (en el caso de infestación). Por lo general, los agentes de destrucción pueden aislarse entonces o derivarse de las esporas o huevos que dejan sobre las plantas.

Encontrar tales agentes no es fácil. El año pasado mi colega Rajeev K. Upadhyay y yo descubrimos un patógeno fúngico de la juncia púrpura mientras andábamos a la caza, en la India, de plantas que tuvieran manchas amarillentas o necróticas. Ahora estamos examinando la posibilidad de explotar el hongo *Ascochyta cypericola,* para controlar esa hierba dañina.

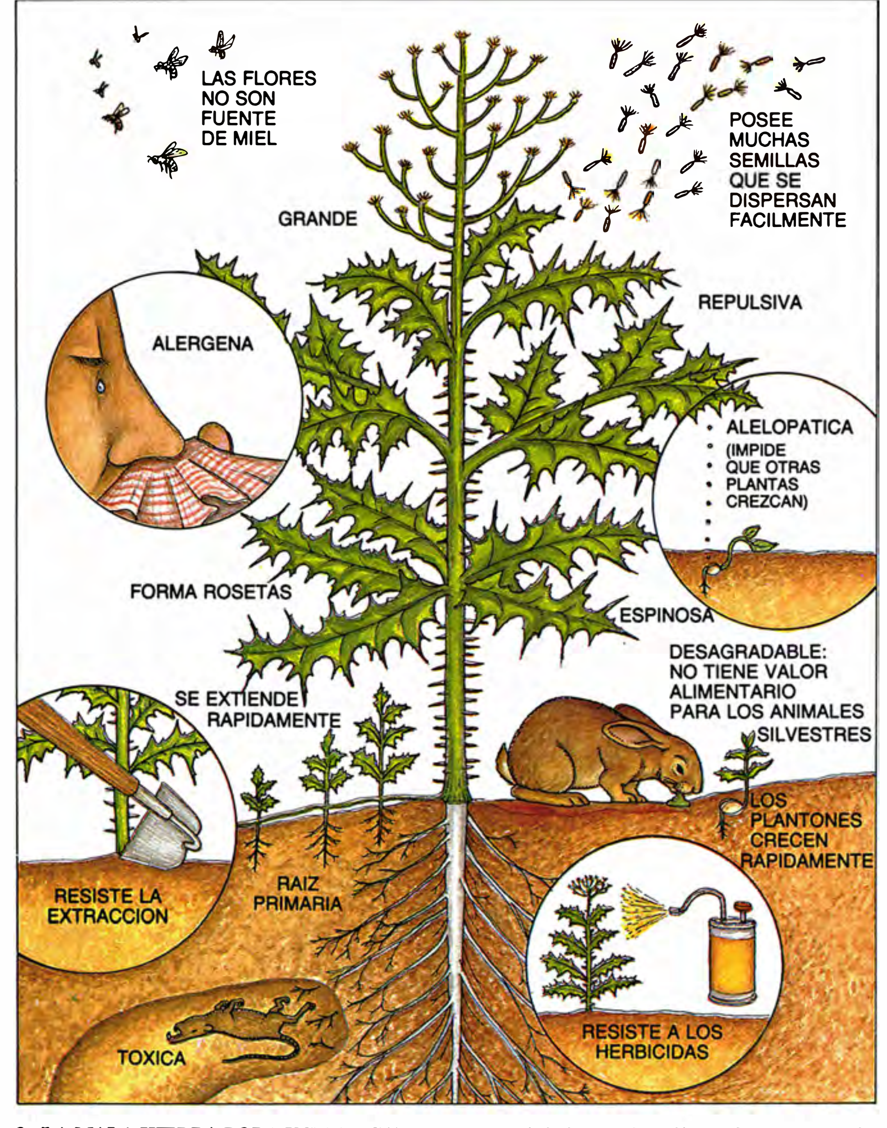
En general, los biólogos se centran en los agentes que atacan, de manera exclusiva y eficaz, a una especie o a una gama limitada de malezas relacionadas. Pero no se soltarán los organismos hasta que no se hayan satisfecho varias etapas. Entre ellas se cuentan pruebas en invernadero, seguidas por pruebas limitadas en el campo en pequeñas parcelas aisladas y, subsiguientemente, estudios de campo más amplios.

En el caso de insectos y patógenos exóticos, las leyes de muchos países obligan a que los investigadores realicen todos sus análisis de laboratorio y pruebas de invernadero en condiciones de cuarentena, restringiendo la entrada y salida de personas, aire y agua. Deben manejarse, además, los organismos exóticos con cuidado suplementario en todas las etapas del estudio, para evitar desencadenar epidemias no deseadas, lo que ocurrió en el pasado con la liberación accidental de los microbios responsables de la enfermedad del olmo holandés, el tizón del castaño y enfermedades de los cítricos, manzanas, peras y plátanos.

Los organismos que la industria o las agencias gubernamentales adoptan para el control de malas hierbas han de cumplir varios requisitos: los insectos, poder reproducirse fácilmente; los microorganismos patógenos, generar abundantes esporas u otras estructuras que den origen a nuevas generaciones; los microbios, mantener su viabilidad cuando se les «formula», es decir, cuando se les mezcla con sustancias que evitan la desecación y facilitan la adhesión a las malas hierbas.

Por último, excepción hecha de cuando pretendamos atacar a un amplio espectro de malezas, los organismos serán específicos contra una mala hierba objetivo y dotados de fuerza capaz de debilitarla bajo una amplia gama de condiciones ambientales. En ciertos países, la reglamentación exige, asimismo, que los investigadores aporten pruebas de seguridad antes de que un organismo pueda probarse fuera del laboratorio y distribuirse en gran escala.

Los primeros organismos patógenos que pasaron esta carrera de obstáculos científicos y administrativos empezaron, en los años ochenta, a sumarse a los productos establecidos del mercado, basados en insectos. Algunos de los productos de que ahora se dispone o que tienen probabilidades de venderse en un futuro inmediato son indígenas del área de aplicación; otros son importados del hogar original de la mala hierba.



2. LA MALA HIERBA POR EXCELENCIA no posee propiedades que la rediman. De aspecto nada vistoso e inútil, es desagradable o tóxica para los animales y carece de azúcar para la miel. Crece mucho, prolifera rápidamente e inhibe el desarrollo de otras plantas (alelopatía). Desencadena reacciones alérgicas en los seres humanos. Y no hay manera de eliminarla: con su larga raíz primaria y sus rosetas, resiste la extracción mecánica y no puede ser eliminada mediante herbicidas.

El rendimiento de uno de los pioneros en el mundo comercial, una cepa del hongo *Colletotrichum gloeosporioides* (nombre comercial: Collego) es, en cierto modo, típico de los nuevos herbicidas basados en agentes patógenos. Este hongo en particular, representante del grupo indígena, procede del sur de los Estados Unidos y está ayudando a frenar los destrozos provocados por la arveja de Virginia *(Aeschynomene virginica)* en los arrozales de Arkansas. Fue identificado como agente de control en potencia, formulado y probado por George E. Templeton y su grupo, de la Universidad de Arkansas.

Los compuestos químicos (herbicidas fenoxi) que los agricultores despliegan normalmente contra la mala hierba matan las plantas de arveja de Virginia, pero cuando los productos químicos se aplican sin precaución pueden dañar el arroz, el algodón y la soja de los campos vecinos. En cambio, el "micoherbicida" no daña las cosechas. Tarda más que los productos químicos en desarrollar su efecto, y es algo menos potente: mata quizás el 99 por ciento de su objetivo. Un período de tiempo que es, a pesar de todo, razonable y una tasa de mortalidad aceptable, porque no se exige la erradicación de hasta la última mata si la población ha caído lo suficiente para evitar que compita con las plantas cultivadas.

La roya *Puccinia chondrillina,* que es un hongo que hace que las plantas aparezcan como herrumbrosas, tiene un libro de ruta similar. Ejemplo de patógeno importado, está ayudando a los australianos a limitar la expansión de la achicoria dulce *(Chondrilla juncea)*, una exportación mediterránea. Al igual que en el caso anterior, este micoherbicida no erradica absolutamente todas las plantas de la achicoria dulce, pero aun así, está ahorrando cientos de millones de pesetas anuales, dinero que se habría gastado en los herbicidas tradicionales y en trabajo.

Por desgracia, tal como ocurre en muchos campos de la ciencia, las promesas no siempre se transforman en aplicaciones útiles. En realidad, la mayoría de insectos y de microorganismos que mantienen a raya a las malas hierbas en el invernadero resultan ineficaces en el campo, donde el clima y el suelo ofrecen mayor variabilidad y donde pueden existir enemigos naturales no previstos del agente biológico. Peter Harris, del Departamento de Agricultura del Canadá, ha señalado que en pruebas de campo en Australia, sólo cinco insectos de 51 introducidos para controlar la chumbera han conseguido su propósito.



3. LA CHUMBERA *Opuntia vulgaris* fue la primera mala hierba en ser controlada por un insecto: *Dactylopius ceylonicus (detalle)*. Ocurrió ello a mediados del siglo XIX, en la India.

Por otra parte, los logros obtenidos hasta la fecha demuestran la eficacia de los agentes biológicos y su posibilidad de convertirse en opción alternativa de los productos químicos. Además, si se siguen los protocolos que he descrito, el riesgo de dañar por error plantas deseables es pequeño. Suzanne W. T. Batra, del Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, ha indicado que, de 100 insectos introducidos en todo el mundo para el control de las malas hierbas, ninguno ha alterado sus hábitos alimentarios ni abandonado la mala hierba que le sirve de alimento para atacar plantas aprovechables. Tampoco se ha registrado ninguna equivocación en el cumplimiento de lo previsto sobre organismos patógenos ya liberados; ninguno ha atacado plantas que no hubiera dañado anteriormente.

Mi grupo está investigando un enfoque biológico que eximiera de la necesidad de liberar organismos enteros, lo que eliminaría el riesgo minúsculo de que, de forma inesperada, los organismos patógenos se asentaran en patrones nuevos. Nuestra estrategia se funda en las fitotoxinas, sustancias que los microbios producen y atentan contra las malas hierbas. La aplicación de estos compuestos obviaría también la necesidad de asegurar la viabilidad de los microbios, una vez formulados, almacenados y aplicados a las malas hierbas.

El estudio de las fitotoxinas es atractivo, además, por otras razones. Extraídas de los organismos patógenos, las toxinas se investigan una a una para descubrir claves que nos orienten en la identificación del proceso en cuya virtud los patógenos matan las hierbas dañinas. El conocimiento de la estequiometría de los compuestos constituirá el primer paso para su síntesis, librándonos así de la necesidad de recolectar o mantener colonias de organismos patógenos que produzcan fórmulas mortales para las malas hierbas. Más aún, cabrá sintetizar derivados que redoblen la eficacia de las toxinas originales.

Llevamos diez años en mi laboratorio estudiando fitotoxinas, en colaboración con los grupos de Jon C. Clardy, de la Universidad de Cornell, y Fumio Sugawara, del Instituto de Investigación Física y Química, en los aledaños de Tokio. Una década es un tiempo corto, si se considera que estas investigaciones exigen mucho tiempo y el número restringido de científicos empeñados en el campo de las fitotoxinas. Pero se han hecho progresos importantes.

Se han examinado más de 25 hongos que matan malas hierbas. En su inmensa mayoría, salvo royas y mildius quizás, elaboran fitotoxinas. Cuando producen una tal toxina, sintetizan también, o así parece, una familia de compuestos que guardan relación estructural con aquélla. En una familia dada, la mezcla puede incluir a la vez moléculas no tóxicas y moléculas fitotóxicas.

En ocasiones, los compuestos emparentados matan porque actúan al unísono. ¿Qué sugiere ello? Que habrá algún día herbicidas, basados en fitotoxinas, que estarán constituidos por varios miembros de una misma familia estructural. ¿Cuál es, enton-

ces, el papel de las sustancias que no poseen toxicidad? Sospecho que los hongos generan a veces muchos derivados de una molécula, para asegurar que al menos uno de ellos dañe la planta, con lo que se garantiza que el hongo causante de la enfermedad tendrá acceso a los nutrientes de la planta.

En lo que ha sido un resultado ligeramente desconcertante, sólo una de las fitotoxinas que se han aislado hasta la fecha a partir de un hongo específico de una mala hierba resulta, al propio tiempo, específica de la planta patrón (señal de que la especificidad de la mayoría de hongos procede de otros factores). Por lo menos, algunas fitotoxinas son selectivas: dañan a un conjunto limitado de malas hierbas emparentadas. Pero la mayoría de las demás no poseen selectividad y podrían atentar contra plantas valiosas si se aplicaran como herbicidas. Aun así, el descubrimiento de unas pocas fitotoxinas específicas o selectivas implica que existen otras: sólo queda descubrirlas. De hecho, si se tiene en cuenta que existen miles de especies de malas hierbas y que cada una de ellas es sensible a 20 o más agentes patógenos, entonces la lista de hongos y de otros patógenos sin considerar se nos hace abrumadora.

A lo largo de los últimos diez años hemos ido conociendo varias fitotoxinas y los compuestos con ellas relacionados. Por tratarse de un área de investigación bastante nueva se ignora de qué manera la mayoría de los compuestos dañan a las plantas. A modo de excepción que confirma la regla, Doug Kenfield, de la Universidad estatal de Montana, ha explicado por qué motivo las triticonas A y B, que derivan del hongo *Curvularia clavata,* son tóxicas para varias gramíneas. Inactivan enzimas básicas para la supervivencia de las malas hierbas al combinarse con grupos sulfhidrilo en los sitios activos de las enzimas. Así enlazadas, las enzimas quedan "maniatadas" para relacionarse con otras moléculas.

Nuestra línea de trabajo en la investigación y análisis de fitotoxinas, así como los retos y la atmósfera que lo rodea, pueden describirse a través del ejemplo de la maculosina, fitotoxina que afecta a la centaurea man-

Una selección de patógenos de malas hierbas en el mercado o en estudio

PATOGENO	MALA HIERBA	DONDE LA MALA HIERBA ES PERJUDICIAL
Actualmente en venta		
Colletotrichum gloeosporioides nombre comercial: Collego	Arveja de Virginia (*Aeschynomene virginica)*	Arrozales en Arkansas
Phytophthora palmivora nombre comercial: DeVine	Parra de vencetósigo (*Morrenia odorata*)	Cultivos de cítricos en los Estados Unidos sudorientales
A la espera de ser comercializados		
Alternaria cassiae nombre comercial: Casst	Casia (*Cassia obtusifolia*)	Cultivos de soja y cacahuete en los Estados Unidos sudorientales; varios cultivos en Australia
Colletotrichum gloeosporioides (cepa distinta de la usada en Collego) nombre comercial: BioMal	Malva rotundifolia (*Malva pusilla*)	Cultivos de cereales de grano pequeño en los Estados Unidos y Canadá
Han resultado prometedores en pruebas de campo*		
Alternaria helianthi	Cadillo (*Xanthium pennsylvanicum*)	Cultivos de soja en los Estados Unidos meridionales; cultivos en Australia e Israel
Alternaria macrospora	Anoda de espuelas (*Anoda cristata*)	Cultivos de algodón y soja en los Estados Unidos meridionales
Cercospora rodmanii	Jacinto acuático (*Eichhornia crassipes*)	Cursos de agua en las regiones tropicales y semitropicales del mundo
Colletotrichum coccodes	Hojas velludas (*Abutilon theophrasti*)	Cultivos de maíz y soja en los Estados Unidos del Medio Oeste
Sclerotinia sclerotiorum (modificado genéticamente)	Cardo lanudo del Canadá (*Cirsium arvense*)	Cercados, pastos, taludes de cunetas y cultivos de grano pequeño en las regiones templadas del mundo

* Seleccionados de una larga lista de organismos prometedores

Arveja de Virginia — Parra de vencetósigo — Casia — Malva rotundifolia — Cadillo — Anoda de espuelas — Jacinto acuático — Hojas velludas — Cardo lanudo del Canadá





4. RETAZO DE PLANTAS MUERTAS ***(izquierda)*** **en un campo de anoda de espuelas** ***(Anoda cristata)*****, una mala hierba común en la mitad oriental de los Estados Unidos; demuestra el potencial herbicida del hongo** ***Alternaria macrospora*****. Es preciso realizar experimentos de campo limitados de este tipo antes de intentar pruebas a mayor escala de microbios o insectos.**

Un ejemplar de centaurea manchada ***(Centaurea maculosa, planta de la izquierda en la fotografía de la derecha)*** **fue víctima de una estrategia biológica diferente. Resultó dañada por maculosina, una fitotoxina (sustancia que mata plantas) específica de la centaurea extraída del hongo** ***Alternaria alternata*****. Un ejemplar no tratado permaneció sano.**

chada *(Centaurea maculosa)*. Esta hierba dañina, que produce flores rosadas punteadas de manchas blancas, infesta los Estados Unidos noroccidentales y el Canadá sudoccidental.

Se introdujo probablemente en los años veinte, después de que sus semillas se mezclaran con otras importadas de Europa, como las de alfalfa. O bien la trajeron los apicultores que volvieron de Europa, para convertirla en fuente de miel; las abejas fabrican miel a partir del néctar de las flores, y quizá sea la presencia de material azucarado la única característica compensadora de la planta.

La centaurea desplaza a la mayoría de gramíneas y de plantas con flores en su nuevo hogar; ocupa rápidamente laderas de colinas y pastos. Las tierras se tornan inservibles para el pastoreo, porque los animales no quieren comerla. La infiltración de este azote en tierras de pastos cuesta a los rancheros millones de dólares cada año sólo en Montana, cantidad que está aumentando con la propagación de la centaurea manchada.

En la primavera de 1984, Andrea C. Stierle comunicó su deseo de realizar la tesis doctoral sobre algo que combina química y fitopatología. La animé a que intentara aislar y analizar fitotoxinas activas contra la centaurea. La tarea iba a ser difícil; el vaciado de la bibliografía reveló que no se había descrito todavía ni un solo patógeno contra la misma.

Stierle y su marido pasaron el verano buscando en vano especímenes enfermos en los pastos de montaña de Montana. Después, un día del mes de septiembre siguiente, en una ladera cerca de su casa en Butte, Stierle advirtió una planta de centaurea gravemente dañada, con hojas y tallos marcados por manchas negras, indicadoras de muerte hística. De vuelta al laboratorio, aisló un hongo patógeno de las lesiones y demostró que causaba manchas similares en plantas de centaurea sanas en el invernadero. El patógeno era una nueva cepa de un hongo común, *Alternaria alternata.*

Stierle dirigió su atención a la química. En el laboratorio universitario de John H. Cardellina II hizo crecer cultivos del hongo. Con gran trabajo extrajo y purificó los compuestos que producía. Determinó luego la estructura química de las moléculas que parecían dañar a la centaurea.

Algunos de los productos activos eran fitotoxinas fabricadas también por otros hongos. Pero había dos productos emparentados insólitos. Uno de ellos era sólo ligeramente tóxico: el otro, que denominamos maculosina, nos sorprendió. Aplicado en dosis incluso minúsculas, éste producía las manchas negras características en las hojas de la centaurea. Y lo que encerraba todavía mayor interés: dañaba exclusivamente a la centaurea manchada, pero no a otras plantas con las que se probó, entre ellas dos parientes cercanas, la centaurea rusa y la centaurea difusa. Nos hallábamos ante la primera fitotoxina específica de planta que se hubiera descubierto nunca.

Stierle fabricó maculosina sintética, como primer paso de otra línea de trabajo: explorar el mecanismo de acción. Sang Ho Park se agregó luego al proyecto. Creó una versión de maculosina marcada radiactivamente y demostró que la mala hierba convertía la maculosina en al menos otros tres productos; uno o varios de éstos bien pudieran ayudar a producir las lesiones negras. Mientras tanto, se está analizando la estructura química de los compuestos y se pretende cartografiar los pasos de sus interacciones moleculares en el patrón.

Todo ello, sin dejar de darle vueltas a una cuestión central: por qué sólo la centaurea manchada se muestra sensible a la acción de la maculosina. Hemos identificado varios receptores específicos del tóxico; sugiere ello que la unión de la maculosina a uno o varios de estos receptores puede dañar a la planta al oponerse a la función normal de los receptores en el patrón. Queda por inserir nuestro hallazgo en el descubrimiento de Park de los tres metabolitos, amén de averiguar si la maculosina o un derivado serviría de herbicida viable. Estamos produciendo formas alteradas de maculosina con el propósito de establecer si alguna de ellas es un mejor candidato para los experimentos de campo que el propio original.

La fumigación generalizada de centaurea manchada con herbicidas tradicionales alcanza un coste prohibitivo; en parte, debido a que se precisan aplicaciones repetidas para evitar el retorno de estas especies resistentes. Quizá la maculosina o una variación sintética todavía más potente ayudará a resolver el problema sin tamaño dispendio. Cuando menos, el descubrimiento del compuesto aviva la esperanza de hallar y explotar otras fito-

Una selección de fitotoxinas en estudio para el control de malas hierbas

El grupo del autor aisló recientemente los compuestos que siguen (a partir de hongos que infectan las malas hierbas "patrón" listadas) y descifró su estructura. El equipo está analizando el potencial herbicida de las fitotoxinas listadas y de muchas de sus moléculas emparentadas, así como de otras varias fitotoxinas. Las moléculas que son específicas de un patrón (es decir, que matan a una especie de mala hierba) o que dañan selectivamente una gama limitada de especies son las idóneas para su desarrollo comercial. Lamentablemente, como muestra la selección que aquí se ha hecho, estos compuestos exigentes son relativamente raros.

FITOTOXINA	HONGO ORIGEN	MALA HIERBA PATRON	DONDE ES PERJUDICIAL LA MALA HIERBA	COMENTARIOS
Bipolaroxina	*Bipolaris cynodontis*	Grama común (*Cynodon dactylon*)	Maíz, algodón, caña de azúcar y otros cultivos en todo el mundo	Primera fitotoxina conocida que es selectiva de patrón
Curvulina	*Drechslera indica*	Verdolaga (*Portulaca oleracea*)	Docenas de cultivos en todo el mundo	Selectiva de patrón y funciona bien a bajas concentraciones
Ciperina	*Ascochyta cypericola*	Juncia púrpura (*Cyperus rotundus*)	Docenas de cultivos en todo el mundo	No selectiva, pero extremadamente tóxica para la juncia púrpura
Exserohilona	*Exserohilum holmi*	Pata de cuervo (*Dactyloctenium aegyptium*)	Maíz, algodón, caña de azúcar y otros cultivos en los trópicos y semitrópicos	No selectiva
Gigantenona	*Drechslera gigantea*	Grama común (*Cynodon dactylon*)	Maíz, algodón, caña de azúcar y otros cultivos en todo el mundo	No es tóxica para las gramíneas pero mata algunas malas hierbas frondosas
Maculosina	*Alternaria alternata*	Centaurea manchada (*Centaurea maculosa*)	Pastos y praderas en los Estados Unidos noroccidentales y el Canadá sudoccidental	Específica de patrón; es la mejor candidata para su desarrollo
Ofiobolina	*Drechslera sorghicola*	Sorgo (*Sorghum halepense*)	Maíz, algodón, caña de azúcar y otros cultivos en la mayor parte del mundo	No es específica, pero algunos de sus derivados parecen ser específicos para otros patrones
Triticonas A y B	*Curvularia clavata*	Varias gramíneas	Céspedes, cultivos y pastos en los Estados Unidos y en otras partes	No específica

Grama común — Verdolaga — Juncia púrpura — Pata de cuervo — Centaura manchada — Sorgo

toxinas específicas o selectivas contra las muchas malas hierbas, ya sea directamente o bien como modelos estructurales de compuestos nuevos, e inocuos para el medio, de lucha contra esa plaga.

Del estudio de las fitotoxinas podrían beneficiarse otras ramas de la ciencia. Se está generando importante información sobre los procesos morbosos inducidos por los hongos en las plantas. Al entorpecer las actividades normales de las plantas, las fitotoxinas sacan a la luz valiosos detalles de la fisiología vegetal. En el futuro, algunas podrían resultar de interés para la terapia humana.

Durante muchos años, la investigación del biocontrol de las malas hierbas, limitada, anduvo a salto de mata. Tras el progreso reconocido en la investigación de fitotoxinas y los estudios de campo de otros agentes prometedores, el número de interesados crece, así como el aflujo de subvenciones. La estrategia del control "integrado" de malas hierbas (que combina las medidas biológicas con prácticas de cultivo modificadas y el uso reducido de herbicidas químicos) se hará cada vez más común. Este enfoque requiere, sin embargo, redoblado esfuerzo y atención. Pero sospecho que mucha gente decidirá que el esfuerzo vale la pena si produce alimentos sanos y un ambiente limpio.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIOLOGICAL CONTROL OF WEEDS WITH PLANT PATHOGENS. Dirigido por Raghavan Charudattan y H. Lynn Walker. John Wiley and Sons, 1982.

POTENTIAL NEW HERBICIDES-PHYTOTOXINS FROM PLANT PATHOGENS. Doug Kenfield, Greg Bunkers, Gary A. Strobel y Fumio Sugawara en *Weed Technology*, vol. 2, págs. 519-524; octubre de 1988.

MACULOSIN, A HOST-SPECIFIC PHYTOTOXIN FOR SPOTTED KNAPWEED FROM *ALTERNARIA ALTERNATA*. Andrea C. Stierle, John H. Cardellina II y Gary A. Strobel en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 85, págs. 8008-8011; noviembre de 1988.

MICROBES AND MICROBIAL PRODUCTS AS HERBICIDES. Dirigido por Robert E. Hoagland. Washington, D.C., American Chemical Society, 1990.

RELEASE OF *FUNGI*: LARGE-SCALE USE OF FUNGI AS BIOLOGICAL WEED CONTROL AGENTS. R. Charudattan en *Risk Assessment in Agricultural Biotechnology: Proceedings of the International Conference*. Publicación n.° 1928. University of California, 1990.

Metalurgia de aleaciones de cobre en el Perú antiguo

Hace más de mil años, la civilización de América del Sur se basaba en aleaciones de cobre. Excavaciones recientes han sacado a la luz muchos aspectos de su metalurgia, desde la extracción hasta su conformación

Izumi Shimada y John F. Merkel

Se estima que entre los años 1533 y 1534 los conquistadores saquearon unas 10 toneladas de oro de 22 quilates y 70 toneladas de plata fina de las ciudades incas de Cajamarca y Cuzco. De entonces acá, los ladrones de tumbas han violado decenas de miles de sepulturas precolombinas en busca de objetos de oro y plata. En la mayoría de los casos, fundieron los metales preciosos y rechazaron todos los utensilios de cobre y otros metales comunes que encontraron.

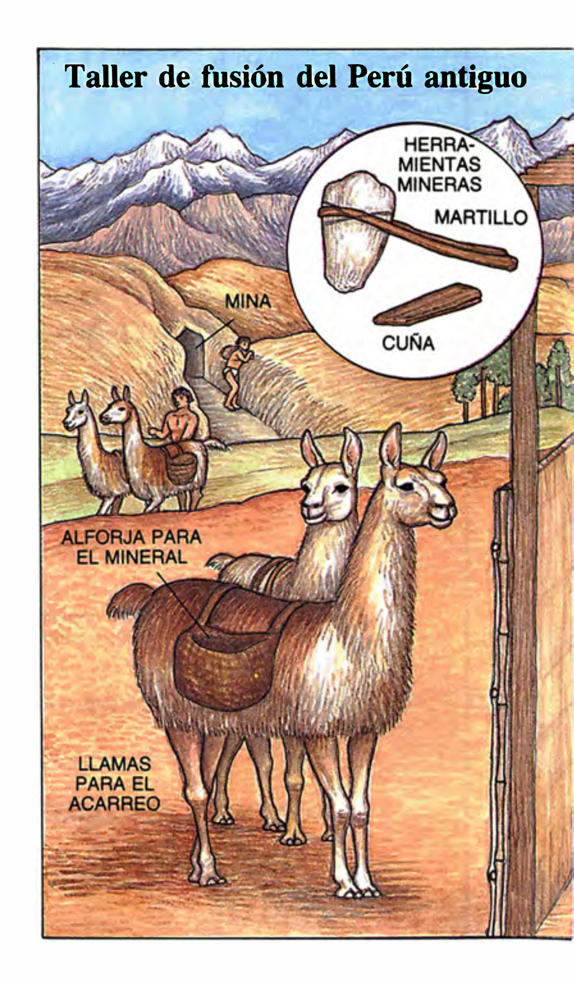
Los objetos que sobrevivieron a este expolio fueron analizados durante los siete primeros decenios de este siglo por especialistas eminentes: Paul Bergsoe, J. B. Bird, E. R. Caley, C. H. Mathewson, N. E. H. Nordenskjöld y W. C. Root, quienes reconocieron los importantes logros de los metalúrgicos andinos. Sin embargo, dado que la mayoría de los objetos que examinaban provenía de tumbas, obtuvieron escasa información sobre los usos de los metales en la vida cotidiana de los pueblos precolombinos, o sobre su manufactura.

IZUMI SHIMADA y JOHN F. MERKEL han venido colaborando durante los últimos ocho años en investigaciones sobre la metalurgia precolombina y colonial en el norte de Perú. Shimada se halla adscrito al Museo Americano de Historia Natural y al Museo Peabody de Arqueología y Etnología de la Universidad de Harvard. Durante los últimos once años, ha dirigido el Proyecto Arqueológico Sicán, que investiga la cultura prehispana en la costa norte del Perú. Merkel, profesor del departamento de conservación arqueológica y ciencia de materiales del Instituto de Arqueología de la Universidad de Londres, se dedica a la conservación arqueológica y la arqueometalurgia.

A pesar de las lagunas existentes en el registro arqueológico, Caley y otros investigadores consiguieron hacer encajar ciertos aspectos de la metalurgia de los metales comunes en el Nuevo Mundo. Advirtieron que el cobre y sus aleaciones constituían los metales de mayor uso, cuya producción representaba uno de los hitos de los pueblos del Perú antiguo.

Más recientemente, Heather N. Lechtman, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, llevó a cabo el primer examen a fondo de diversas minas y lugares donde se realizaron actividades metalúrgicas en Perú. Enhebrando los datos recogidos en investigaciones anteriores y los suyos propios, demostró que la metalurgia prehispana se concentraba en dos regiones principales: la costa norte de Perú y, más al sur, el altiplano que se extiende desde la frontera entre Bolivia, Chile y Perú hasta el noroeste de Argentina. Hacia la segunda mitad del primer milenio a.C., tanto los artesanos del norte como los del sur habían conseguido un buen dominio de las técnicas de manufactura del cobre. Hacia el final del primer milenio, habían empezado a producir aleaciones de cobre en grandes cantidades. Los del sur se dedicaban especialmente a las aleaciones de cobre y estaño (bronces). Los del norte trabajaban más con aleaciones de cobre y arsénico. Comparadas con el cobre, las aleaciones (cupro-arsénicas y bronces) son mucho más duras, resistentes y fáciles de moldear.

En 1978 uno de nosotros (Shimada) empezó un proyecto de investigación a largo plazo sobre la tradición metalúrgica de la zona norte. El estudio atrajo muy pronto a Alan K. Craig, geólogo de la Universidad Atlántica de Florida, Ursula Franklin, experta en metales de la Universidad de Toronto, Susan E. Ramírez, historiadora de la Universidad De Paul, y a S. M. Epstein, arqueólogo, y S. J. Fleming, físico, ambos de la Universidad de Pennsylvania. Unos elaboraron encuestas entre la población local y examinaron atentamente toda clase de documentos coloniales españoles para obtener información adicional sobre minas, localización de centros metalúrgicos y objetos de aleación de cobre. Otros se dedicaron a inspeccionar minas prehispanas y excavar en busca de talleres de fundición y de



manufactura en tres puntos, todos en la costa norte de Perú. En 1983 se incorporó Merkel, coautor de este artículo, quien, con otros especialistas, analizó restos metalúrgicos, menas y utensilios de aleación de cobre. Acometimos la excavación de talleres de fusión de cobre precolombinos, tarea que hasta entonces nadie había realizado y que se ha visto recompensada con el descubrimiento de 50 hornos, auténticas muestras de la evolución de la metalurgia local a lo largo de seis siglos, del 900 al 1500 d.C.

Nuestros trabajos de campo y análisis de laboratorio condujeron a la caracterización general de la metalurgia de aleaciones de cobre en la costa norte del Perú prehispánico. Gracias a esos hallazgos hemos conseguido recrear los hornos y técnicas de fusión empleados por los pueblos antiguos de la zona. Las excavaciones y experimentos nos dieron una idea sobre el volumen de producción de aleaciones de cobre y sus costes en términos de material y mano de obra. También nos fueron de gran ayuda en el estudio de los rituales asociados a la metalurgia de aleaciones de cobre.

La metalurgia del cobre fue introducida en la costa norte peruana por los cupisniques hacia el 500 a.C. Se dedicaban éstos primordialmente a la agricultura y a la pesca, si bien en algunas de sus sepulturas se han encontrado pequeños objetos de cobre o de cobre recubierto de oro. Los sucesores de los cupisniques, los mochicas, gobernaron la costa norte desde el 300 al 550 d.C. Conocidos por sus grandes templos, sistemas de regadío y artesanía, los mochicas dieron un gran impulso a la metalurgia del oro y del cobre, proporcionando los fundamentos para subsiguientes innovaciones en los procesos de aleación y fusión.

Al parecer, los artesanos mochicas fueron los primeros en obtener aleaciones cobre-arsénico allá por los primeros siglos de nuestra era. También producían tumbaga, una aleación cobre-oro muy apreciada y apropiada para la laminación.

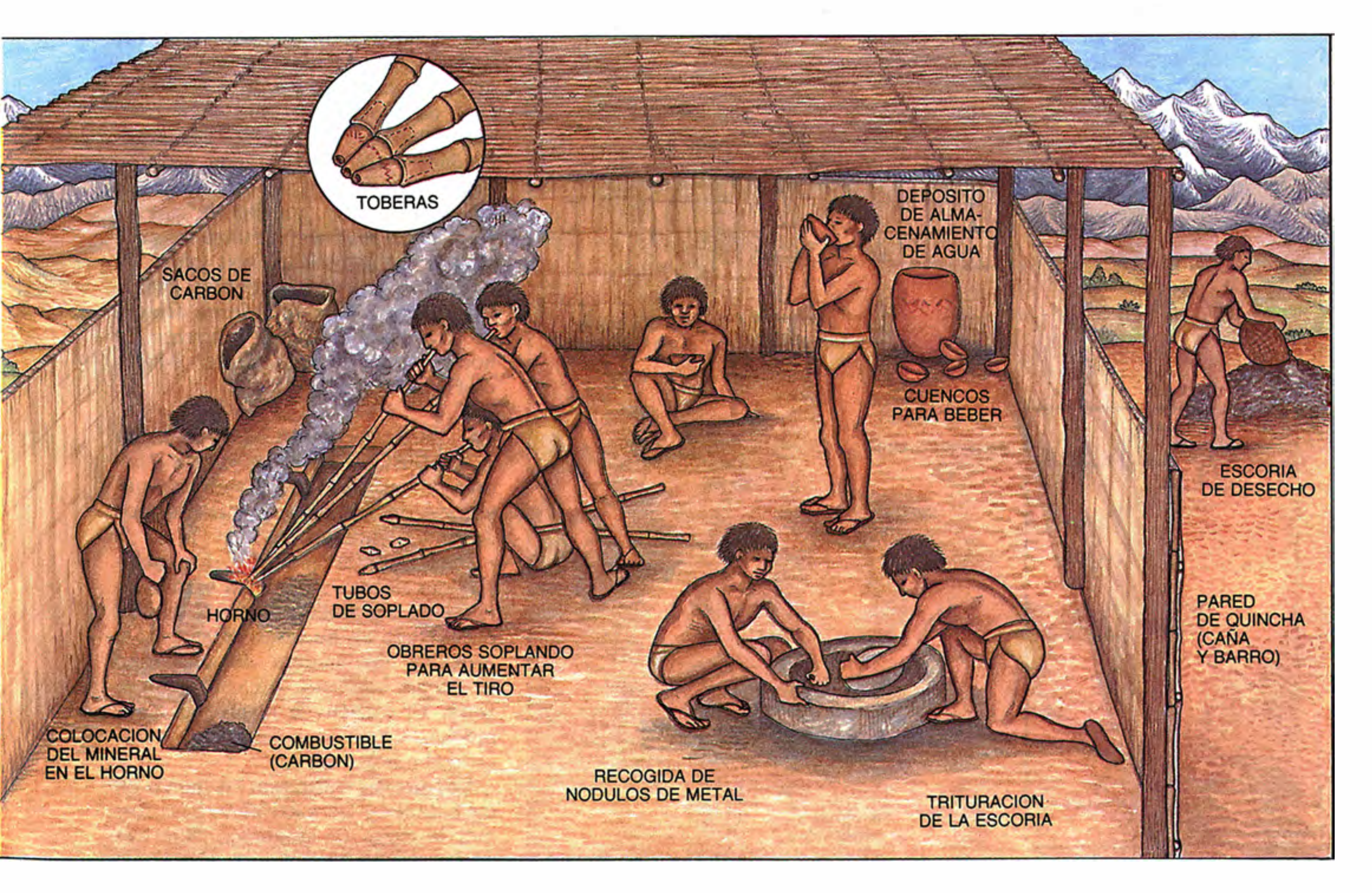
Hay que avanzar hasta aproximadamente el 900 d.C. para observar, con la llegada de los sicanes, la primera producción a gran escala de aleaciones cobre-arsénico. La cultura sicán, que dominó la costa norte entre los años 900 y 1100 d.C., se fundamentaba en la agricultura de regadío, el comercio marítimo con Ecuador y la producción de aleaciones de cobre. Gracias al impulso de los sicanes, las aleaciones de cobre sustituyeron a éste en el norte de Perú.

Los chimúes conquistaron a los sicanes en el año 1375 y construyeron la más poderosa civilización andina hasta la llegada del Imperio Inca, aproximadamente en el año 1470 d.C. Los chimúes trasladaron a los metalúrgicos sicanes hasta la ciudad de Chan Chan, pero el afino y la minería se mantuvieron en su lugar. A pesar de los grandes esfuerzos de los incas por implantar los bronces como metal del Estado, parece ser que respetaron la tradición metalúrgica y permitieron una producción continuada de aleaciones cobre-arsénico.

Desde 1532, año en que Francisco Pizarro y otros conquistadores invadieron Perú, la técnica europea fue sustituyendo con celeridad la tradicional metalurgia indígena.

Entre el 900 y el 1532 d.C., uno de los centros de producción de aleaciones de cobre más importantes fue la región de Batán Grande, en el valle del río Leche. En 1978 uno de nosotros (Shimada) centró su interés en esa zona, tal era la cantidad y diversidad de objetos de aleación de cobre encontrados; se sabía, por ejemplo, que la tumba de un jefe sicán contenía objetos de aleación con un peso total de unos 500 kilogramos.

Muchas son las pruebas que apuntan a una intensa actividad metalúrgica en Batán Grande y sus alrededores: la región estaba sembrada de



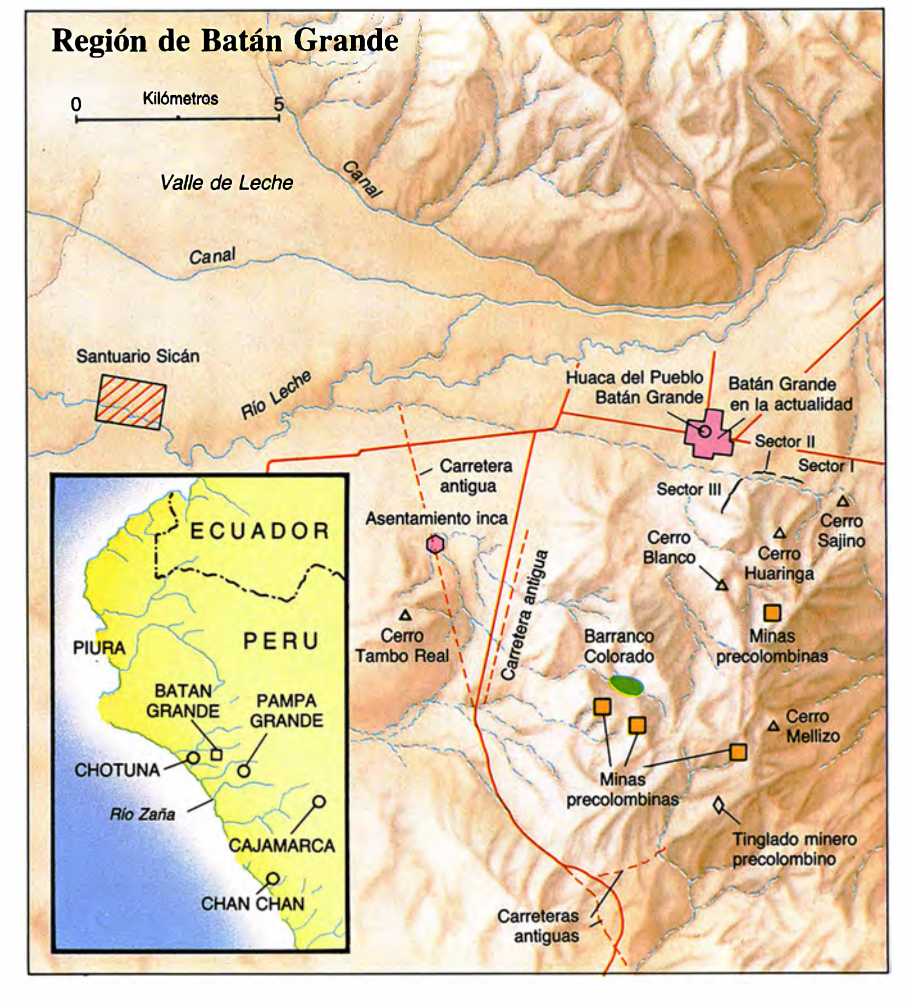
instrumentos de diversa índole usados, sin duda, para la fusión y conformación de metales; las excavaciones habían descubierto grandes acumulaciones de escombros, que parecían ser materiales de desecho de la obtención del cobre; y, por último, la exploración de la zona puso de manifiesto antiguas minas de cobre.

La primera prueba de intensa actividad de extracción mediante fusión de aleaciones de cobre se descubrió en Huaca del Pueblo Batán Grande (en adelante, HPBG), situada en la actual ciudad de Batán Grande. En 1979, 1982 y 1983 uno de nosotros (Shimada) y otros tres arqueólogos realizaron tres profundas excavaciones en HPBG, gracias a las cuales descubrieron cuatro conjuntos completos de hornos de fusión y parte de un quinto. Cada conjunto consta de tres a cinco hornos, muy apretados, que fueron construidos durante el Sicán Medio (período que transcurrió entre el 900 y el 1100 d.C.).

Cada horno consiste en una cámara excavada en el suelo del taller. Sus paredes están hechas de una mezcla de arcillas. En la parte superior de la cámara, las paredes forman la boca del horno, abertura más estrecha en uno de sus extremos que en el otro. Debajo mismo de la boca yace el hogar, donde se quemaba el combustible y se fundían las menas. Un horno típico del Sicán Medio medía unos 30 centímetros de longitud, 25 de alto y otros 25 centímetros de ancho.

Los hornos se han conservado bastante bien. Muchos de ellos se han hallado intactos, salvo algunas grietas en las paredes laterales. Los revestimientos interiores eran duros y rugosos, y en muchos casos estaban cubiertos de materiales corroídos, ricos en cobre. Casi todos los revestimientos habían sido reparados con lodo, total o parcialmente, al menos dos veces. Suponemos que eran intentos de paliar el deterioro causado por su uso continuado.

Los talleres de fundición de HPBG estaban someramente cerrados por paredes hechas de quincha, mezcla de caña y barro. No deja de sorprender que los suelos arcillosos de los talleres se vieran libres de escombros metalúrgicos, salvo en las inmediaciones de hornos y artesas, donde aparecían cubiertos de carbón, restos de mena, instrumentos metalúrgicos y cascotes de cerámica, algunos de los cuales estaban recubiertos, por una cara, con residuos metalúrgicos.



Las excavaciones de HPBG pusieron también al descubierto capas de una sustancia oscura y arenosa depositada bajo los suelos del taller. Se trataba de escoria, el resto no metálico de la fusión. La escoria se trituraba sobre grandes batanes, o yunques, por medio de chungos, que eran piedras basculantes y ovoides.

Al inspeccionar las inmediaciones de Cerro Huaringa descubrimos numerosos batanes fabricados con diorita, una roca local. Los batanes tienen concavidades centrales muy bien pulidas, de aproximadamente 0,75 a 1 metro de diámetro; el elevado número de esos yunques imponentes ha dado nombre a la región.

La fusión constituía un acto importante y creativo para los sicanes, impregnado de simbolismo. En otras partes del mundo donde se han conservado la fusión y el moldeo tradicionales, el proceso suele ir precedido y seguido de solemnes rituales, en los que se ofrece comida, bebida y otros elementos a las deidades protectoras para pedir su ayuda y dar gracias.

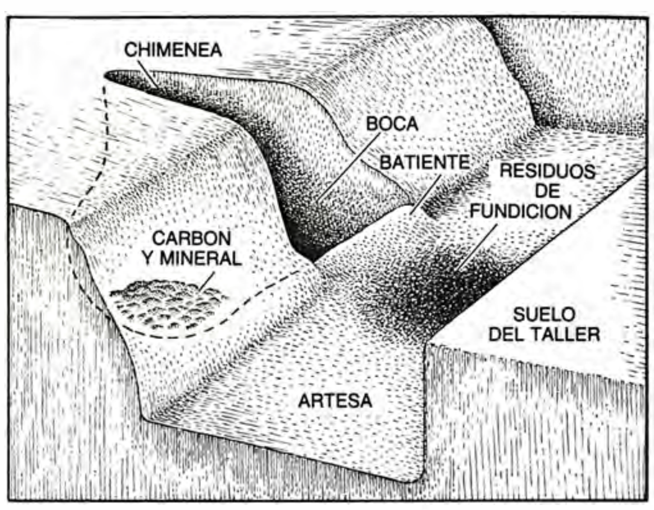
La importancia simbólica que la fundición tenía para los sicanes se muestra quizá de forma más patente en las ofrendas asociadas a los hornos. Justo antes de construir el primer conjunto de hornos de HPBG, enterraron varios fetos de llama (o tal vez llamas recién nacidas) en una ancha y profunda capa de material orgánico, capa que cubría también cinco cavidades cónicas, distribuidas con regularidad, y rellenas con una capa de fina grava, seguida de otra de arena blanca y tapadas, por último, con arcilla. A no más de un metro de cada cavidad se colocaban unas jarras de cuello corto, con alimentos quizá. Ofrendas similares se hicieron cuando se abandonó el último conjunto de hornos del período Sicán Medio de HPBG.

A partir de cuanto observamos en HPBG y en otros lugares, hemos reconstruido las técnicas de obtención de aleaciones cobre-arsénico de los antiguos sicanes.

Para calentar el horno, los metalúrgicos sicanes quemaban carbón en el fondo del hogar. Todo el carbón encontrado en nuestras excavaciones provenía de madera de algarrobo *(Prosopis juliflora)*, disponible en la zona. El carbón de algarrobo tarda mucho tiempo en consumirse y desprende mucho calor.

Los sicanes trituraban las menas en los batanes y las mezclaban para formar la carga de fundición. Sus tres componentes básicos eran menas de





1. HORNOS DE FUNDICION (*izquierda*), usados por los sicanes, encontrados en Huaca del Pueblo Batán Grande. Dos de ellos tienen una ofrenda ritual colocada junto a su boca. El diagrama esquemático de la derecha nos muestra el interior de un horno.

cobre, de arsénico y de hierro, cuidadosamente seleccionadas. El hierro servía como fundente, para lograr que las sustancias no metálicas de la carga pudieran separarse del metal cobre-arsénico.

Los hornos contenían entre 1,25 y 3,50 litros de carga (pudimos deducir el volumen examinando la "línea de flotación" de la escoria en las paredes del horno). Los sicanes colocaban también tubos de soplado en la boca del horno, con boquillas de cerámica ajustadas a sus extremos, que reciben el nombre de toberas; recuperamos muchas en HPBG y en otros centros metalúrgicos. A juzgar por su forma y tamaño, la boca del horno podía acomodar unas cuatro toberas. Al soplar por los tubos, se aceleraba la combustión del carbón y se incrementaba la cantidad de calor del horno. (Según las fuentes históricas, los pueblos prehispanos de Perú no usaron ningún tipo de fuelle.)

El análisis de escorias y otras pruebas dan a entender que la combustión del carbón, aun favorecida por la corriente de aire insuflada a golpe de pulmón, no producía suficiente calor para licuar del todo la carga. Por el contrario, lo que se obtenía era una masa viscosa de escoria fundida, que albergaba una gran cantidad de pequeños nódulos o perlas esféricas de metal casi puro de algunos milímetros de diámetro. Debido al estado viscoso en que permanecía la escoria a lo largo del proceso de fusión, los nódulos quedaban atrapados; no precipitaban, pues, al fondo del horno para formar lingotes.

Para extraerlos, sacaban la escoria del horno, la trituraban con un conjunto batán-chungo y los recogían manualmente. Pudimos inferir la ineficacia del método de recuperación al comprobar el número elevado de minúsculos nódulos, de menos de un milímetro de diámetro, contenidos en la escoria descartada. La mayoría de los nódulos recolectados, muy pequeños, no podrían trabajarse directamente, por lo que hay que suponer que se refundían, afinaban y condensaban en pequeños lingotes.

La producción de metales en HPBG tocó a su fin hacia el 1100. Casi al mismo tiempo, los sicanes empezaron a establecer sus talleres de fusión en la zona noroeste (sector III) del cercano Cerro Huaringa. Hacia el 1300 habían construido ya al menos veinte talleres. Encontramos un número parecido en la ladera norte de Cerro Sajino, tres kilómetros al este de Cerro Huaringa. Tras el estudio de los estilos de las cerámicas asociadas y el uso de técnicas de datación con carbono radiactivo, dedujimos que dichos talleres se construyeron hacia el 1100.

Una carretera, vieja y sinuosa, unía directamente los dos centros metalúrgicos a una importante mina de cobre, situada en la base de Cerro Blanco. Destruida en buena parte por el paso del tiempo, la mina nos guardaba martillos de piedra desgastados en pozos de prospección cercanos. Además de Cerro Blanco, los mineros sicanes parece que explotaron otras minas. En un radio de seis kilómetros se encuentran las minas de cobre de Cerro Mellizo y Barranco Colorado. Descubrimos algunos segmentos de las carreteras que comunicaban esos yacimientos con la región de Batán Grande.

La conquista chimú de Batán Grande, hacia 1375, comportó cambios significativos en la organización de la producción metalúrgica de Cerro Huaringa. Los talleres de fusión de quincha del sector III fueron sustituidos por sólidas construcciones de obra, todas con el mismo estilo arquitectónico. Estaban unidos a otros talleres, equipados con piedras de yunque colocadas sobre bancos y con recipientes parcialmente rellenos de carbón, seguramente para el recocido. Los chimúes controlaban toda la zona desde una plataforma natural.

A partir de 1470, con la llegada de los incas, se construyeron nuevos talleres de fusión en el sector III, algunos de quincha y otros de obra. Los incas decidieron también separar los talleres de manufactura de los de fusión. No obstante, parece que estos cambios administrativos no alteraron las técnicas metalúrgicas

La mayoría de los talleres chimúes e incas estaban equipados con uno o dos batanes y tres o cuatro hornos. Al contrario de los sicanes, los chimúes e incas no mantenían limpios sus talleres. Los suelos se encuentran llenos de residuos de comida, cenizas, pedazos de carbón, cascotes cubiertos de escoria y fragmentos de tobera. Según parece, por esa época la fusión había perdido gran parte de su significado ceremonial y se había convertido en una actividad más rutinaria y secular.

¿Cómo evolucionó la fundición de aleaciones de cobre durante los 600 años de historia de Batán Grande? Los cambios de los que tenemos noticia no son más que refinamientos de los principios y equipamiento básicos utilizados por los sicanes.

El diseño de los hornos continuó siendo esencialmente el mismo. Un cambio notable fue la disminución de su capacidad media, desde unos 3,3 litros en el Sicán Medio a apro-



2. LAS TOBERAS son boquillas de cerámica que se ajustaban al extremo de los tubos de soplado. Los artesanos metalúrgicos sicanes dieron forma a estas toberas y las decoraron.

ximadamente 1,4 litros durante las dominaciones chimú e inca. Diversas pruebas obtenidas de excavaciones y experimentos sugieren que se redujo la capacidad del horno en un esfuerzo por mejorar la eficacia de la fusión y el resultado obtenido, así como para facilitar su mantenimiento.

También descubrimos algunos cambios estructurales en los hornos. Al examinar el revestimiento de uno construido por los chimúes en el sector III, encontramos que estaba compuesto de una mezcla termorresistente de andesina (45%), mica (40%), cuarzo (15%) y algo de arcilla como aglutinante. El tamaño medio de partícula de los minerales constituyentes era 0,1 milímetros, lo cual indica que habían sido cuidadosamente preparados. En cambio, los anteriores revestimientos de la época sicán se componían mayoritariamente de arcilla mezclada con materia vegetal y arena.

Otra innovación introducida durante los períodos chimú e inca fue el horno de arcilla de dos piezas. El borde de la mitad superior del horno se unía al borde de la inferior mediante una serie de dientes encajados. Más fácil de construir, la estructura de dos piezas probablemente facilitaba también las reparaciones y los repetidos remiendos en el revestimiento del hogar.

Observamos cambios en el diseño de las toberas. Las del Sicán Medio se hacían a mano y se decoraban con simples motivos geométricos. A medida que se iban gastando, muchas se reparaban puliendo los cantos rotos. Las toberas de los períodos chimú e inca, bastante mayores que sus predecesoras, muestran cierta sencillez. Muchas parecen estar hechas con molde y ninguna presenta signos de reutilización.

Aunque el tamaño y la forma de las toberas cambiaron con el tiempo, el diámetro del orificio del extremo distal permaneció en torno a unos ocho milímetros. La anchura de la boca del horno, donde se colocaban las toberas, no sufrió tampoco especial modificación de un período al siguiente. Es probable, pues, que el caudal de aire insuflado en el horno no variase apenas con el tiempo.

Conforme fue mejorando la técnica de fusión a lo largo de 600 años y creciendo el número de talleres y hornos, se intensificó la producción de aleaciones de cobre. Así, por ejemplo, dedujimos que se habían construido siete conjuntos de hornos de fundición en el área central de un taller durante la vida de éste, y que la cámara de cada horno había sido recubierta dos o tres veces. En los alrededores de muchos talleres descubrimos montículos de escoria triturada casi pura de hasta siete metros de ancho y 1,5 metros de alto.

En el sector III de Cerro Huaringa, que fue escenario de una intensa actividad de fundición durante más de 400 años, estimamos la cantidad de escoria estratificada en unas 5000 toneladas métricas. A medida que la escoria y otros residuos de la producción se amontonaban en los talleres durante este período, la altura de los suelos creció en unos 2,5 metros.

Un destacado tema de debate relacionado con la producción prehispánica de aleaciones de cobre-arsénico es el contenido de la carga de fusión. Hasta hace poco, los arqueólogos dudaban acerca de cuál era la fuente de arsénico y el método utilizado para alearlo con el cobre. En lo que concierne a las menas cabía una doble posibilidad: que hubieran estado ya mezcladas en la naturaleza o que se hubiera añadido deliberadamente mena de arsénico al fundir el cobre. Para investigarlo, empezamos por analizar la composición de los nódulos, la escoria, las menas y otros residuos metalúrgicos de nuestras excavaciones.

Las muestras de escoria y de escoria triturada encontradas alrededor de los hornos en los talleres del Sicán Medio de HPBG tienen como característica su heterogeneidad; poseen de un 2 a un 10% de cobre, pero presentan altos contenidos de óxido de hierro (FeO) y dióxido de silicio (SiO_2), con algo de alúmina (Al_2O_3) y óxido de calcio (CaO). Dichas mezclas son bastante parecidas a la escoria producida por otros métodos de fundición de cobre antiguos que empleaban, por fundente, mena de hierro y, por combustible, carbón. En general, dichas mezclas se tienen que calentar hasta temperaturas de 1150-1250 grados Celsius para que la escoria y el metal se licúen y fluyan libremente.

La composición de los nódulos de cobre retenidos en la escoria resulta decisiva para la reconstrucción del proceso de fusión. La concentración de arsénico en los nódulos encontrados en HPBG presentaba una media de aproximadamente un 6%, con valores comprendidos entre el 1 y el 20%. Una pequeña parte de los nódulos contenía hasta un 40%, y entre las muestras obtenidas en los hornos de HPBG también detectamos algo de speiss, una mezcla variable de cobre, arsénico y hierro. El speiss tiene una cantidad considerable de arsénico (41%), así como hierro (56%) y cobre (4%).

Los nódulos de alto contenido de arsénico atrapados en la escoria, junto con la presencia de speiss en los hornos o talleres, nos indican que el arsénico se añadía a la carga. El arsénico no podía proceder de las menas de hierro y de cobre disponibles, con contenidos normalmente inferiores al 0,1%.

Al no encontrar muestras con bajas concentraciones de minerales ricos en arsénico en HPBG, decidimos extender nuestra búsqueda de arsénico a más de 40 muestras de mena de cobre y hierro. Dos de ellas contenían arsénico en cantidades significativas, 6 y 11% respectivamente, pero diferían en color y densidad de las menas de cobre y hierro recuperadas en los centros de fusión; ello sugiere que los metalúrgicos sicanes pudieron reconocer fácilmente las menas ricas en arsénico.

También llevamos a cabo investigaciones en las antiguas minas de Batán Grande, incluida una de Cerro Mellizo. Encontramos allí una mena de arsenopirita ($FeAsS$) y sus productos de intemperie, como la escorodita ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$).

Muchas pruebas halladas en Cerro Mellizo apuntan a una intensa actividad minera prehispana de depósitos superficiales de mineral de arsénico. Cerca de la mina había una carretera delimitada con piedras y dos conjuntos de habitaciones que se construyeron sobre terrazas artificiales. Puede que las habitaciones fueran almacenes o barracones para los mineros. Tal como nos indican las cerámicas recogidas en los alrededores, las habitaciones estuvieron ocupadas ya algunos siglos antes de que los españoles conquistasen Perú. Aparte de Cerro Mellizo, encontramos pruebas

de la minería superficial de minerales de cobre y arsenopirita en otros centros prehispánicos cercanos a Batán Grande.

El examen de la composición de las menas procedentes de los talleres y la identificación de al menos una mina local con menas ricas en arsénico nos indujeron a concluir que las menas de cobre, arsénico y hierro se mezclaban por separado para obtener las cargas de fusión halladas en HPBG y en Cerro Huaringa. Los bajos niveles de arsénico de las muestras de menas de hierro y cobre más comunes no explicarían adecuadamente los productos resultantes. Aunque una pequeña cantidad de mineral con un contenido insólitamente alto de arsénico, incluida en la carga por accidente, produciría aleaciones cobre-arsénico, no serviría para explicar la producción en gran escala de tal aleación a lo largo de 600 años.

Aunque las pruebas arqueológicas y los análisis de laboratorio aportaban valiosa información sobre los materiales, equipo y métodos usados en la fusión, nos faltaba conocer los entresijos del funcionamiento real del horno y cuánta mano de obra se requería para su operación. Con ese propósito, nos aprestamos, en 1986, a reproducir las técnicas de fusión usadas por sicanes, chimúes e incas. Construimos reproducciones de hornos de varios tamaños y también utilizamos un horno chimú encontrado en el sector III de Cerro Huaringa, de 600 años de antigüedad. Las réplicas se construyeron con arena, arcilla y roca del lugar para remedar la composición de los hornos precolombinos.

Obtuvimos mineral de óxido de cobre (31% de cobre) y hematites, un mineral de hierro, provenientes de la mina de Cerro Blanco. Tras escoger los materiales a mano, los trituramos utilizando un batán-chungo del sector III de Cerro Huaringa. Para la carga de fusión mezclamos cantidades iguales de mineral de cobre y hematites. Nos procuramos también carbón de algarrobo para utilizarlo de combustible.

Precalentamos el horno durante 30 minutos, colocamos una pequeña cantidad de carga (menos de 100 gramos) sobre el carbón al rojo, al fondo del horno, y acomodamos tres tubos de soplado en su boca. Al soplar por los tubos y a través de los pequeños agujeros de las toberas, creamos ligeras corrientes de aire que penetraban a través de los trozos de carbón. El tamaño de la corriente limitaba el área que podía calentarse con eficacia a la adyacente a cada tobera. Para operar a un caudal de aire y velocidad de combustión máximos, dos grupos de tres sopladores realizaban turnos de apenas 10 minutos.

Con esta técnica, conseguimos calentar de forma rápida una pequeña carga a unos 1150 grados centígrados. Cuando añadíamos más carga, la que ya habíamos introducido se enfriaba y se solidificaba en escoria; concentramos, pues, nuestros esfuerzos en el material sin procesar. Nunca conseguimos fundir toda la carga al mismo tiempo. Quemamos un par de kilogramos de carbón por hora, un consumo más bajo que el esperado. La velocidad de combustión constituía el factor temporal limitante del proceso de fundición. El horno tampoco podía contener la carga prevista, porque una parte del carbón, no consumido y recubierto de escoria, permanecía en el fondo.

Al cabo de unas tres horas de soplar sin descanso, durante las cuales tratamos 900 gramos de carga en el horno chimú, obtuvimos un pedazo de escoria de 775 gramos. La composición de esta escoria venía a coincidir con la producida por sicanes, chimúes e incas. Trituramos la escoria mediante un batán-chungo y recogimos aproximadamente 30 gramos de nódulos de cobre.

Nuestros experimentos demuestran que la técnica de fusión de aleaciones de cobre empleada por los sicanes era bastante primitiva y que necesitaba mucha mano de obra. Incluso concediendo a los sopladores de la época una habilidad mucho mayor que la nuestra, cada operación habría precisado de cuatro a cinco personas trabajando entre tres y cuatro horas. Dada la proximidad entre los cuatro hornos del taller, sólo dos de ellos podrían utilizarse simultáneamente, lo cual significa más o menos unas cuatro operaciones por taller y día.

Los experimentos pusieron también de manifiesto que su técnica comportaba un elevado coste en combustibles y materia prima. El consumo de combustible en los procesos de fundición primitivos es varias veces mayor que el consumo de menas. Estimamos que las dos docenas de talleres de fusión del sector III de Cerro Huaringa consumirían más de 300 kilogramos diarios de carbón.

Considerando la densidad de la escoria y el volumen del horno, cada uno podría haber contenido unos cinco kilogramos de escoria fundida. Para obtener tal cantidad, se necesitaría una carga de aproximadamente dos kilogramos de mena de cobre (sobre un 30% de cobre) y de cuatro a seis kilogramos de fundente. Cada



3. ESTE PAR BATAN-CHUNGO, encontrado en el sector III de Cerro Huaringa, permite pulverizar la escoria mediante el balanceo del chungo sobre el fondo del batán, tal como lo hace B. Schaffield, miembro del proyecto arqueológico aludido en el artículo.



4. EL EXPERIMENTO DE FUSION, llevado a cabo en 1986, intentó reproducir las técnicas usadas en el Perú antiguo. Se colocó carbón y una mezcla de menas en un horno de 600 años de antigüedad encontrado en Cerro Huaringa. Para generar una corriente de aire sobre el carbón, se soplaba a través de tubos hechos de caña y provistos de toberas en sus extremos.

operación podría haber producido de 0,3 a 0,6 kilogramos de cobre metálico, según la calidad de las menas de cobre y la eficacia de la fusión.

Aunque tales cifras no sean más que toscas estimaciones, comenzamos a apreciar mejor el rango de aquel personaje del Sicán Medio que fue enterrado con unos 500 kilogramos de objetos de aleación de cobre.

Desde una perspectiva moderna, la metalurgia de aleaciones cobre-arsénico de los sicanes era muy derrochadora. A pesar de la trituración de la escoria con los batán-chungo y la cuidadosa recuperación de nódulos, se perdía mucho metal. El bajo caudal de aire que se podía insuflar en los hornos a fuerza de pulmones limitaba enormemente la cantidad de carga a tratar en cada colada. Es más que probable que ésta sea la razón de que los sicanes se vieran obligados a construir múltiples talleres de fusión, cada uno con tres o cuatro hornos.

De todos modos, esta gran exigencia de mano de obra tiene que considerarse en su contexto andino, donde el empleo de muchos trabajadores parecía ser una condición primordial para la productividad. Una gran inversión en mano de obra compensaba las limitaciones técnicas intrínsecas de la fusión primitiva.

En los últimos años, hemos encontrado muchos utensilios de aleación de cobre. Con ellos empezamos a conocer algunos detalles sobre la transformación de lingotes en productos acabados. Desde el período Sicán Tardío hasta la conquista española, gran parte de la actividad de conformación se efectuaba en la zona noroeste (sector I) de Cerro Huaringa. Allí encontramos pruebas de martilleo, recocido y acabado de objetos. Esparcidos por el suelo y en el fondo de las excavaciones yacían martillos y yunques de piedra, fragmentos de metal, cascotes cubiertos de escoria y pedazos de marga —una mezcla de arcilla, arena y carbonato de calcio— que podrían haber servido para limpiar y pulir objetos de metal. Dos técnicas de conformación aparecen como las más comunes: el martilleo (laminación) y el moldeo.

Hemos hallado una serie de urnas grandes y medio enterradas al revés. Se les había retirado la base y estaban parcialmente llenas de trozos de carbón. En HPBG también se hallaron urnas dispuestas de modo semejante, en un nivel superior al de los hornos del Sicán Medio. Creemos que podrían haber contenido brasas de carbón para el recocido.

Buena parte de los lingotes producidos en el sector III de Cerro Huaringa se transportaba al sector I para su posterior elaboración. Ambos sectores quedaban enlazados por un camino real que rodeaba la ladera norte de Cerro Huaringa. Además, no es precisamente una casualidad que el sector I se ubicara en el punto medio entre entre los dos centros de fundición comprobados, Cerro Sajino y el sector III de Cerro Huaringa.

Entra dentro de lo verosímil que, durante el gobierno de los chimúes, la mayoría de los productos procedentes del sector III, nódulos incluidos, se distribuyeran por todo su territorio norteño. Se han encontrado talleres de manufactura, construidos durante el mismo período, en excavaciones del centro ceremonial de Chotuna y la capital Chan Chan.

Con anterioridad, durante el período Sicán Medio, los productos de HPBG quizá se enviaran a un santuario que dista unos 13 kilómetros. Este centro religioso comprende una docena de templos monumentales de adobe y extensos cementerios. En la zona que rodea a los templos, recuperamos moldes rotos, objetos mal moldeados, fragmentos de piedra descantada y cascotes recubiertos de escoria. Algunos recipientes de cerámica presentaban un revestimiento interior de arcilla, que reforzaría su estabilidad y su resistencia al calor. Tales recipientes estaban cubiertos de escoria y de grupos de nódulos parcialmente solidificados. Se trataba, así lo vemos, de crisoles que se llenaban de nódulos y se calentaban para formar lingotes. Es verosímil que la élite sicán del santuario supervisase la manufactura de objetos metálicos para usos rituales y funerarios, pero no hay ninguna prueba de actividad de fusión en esos centros.

Los aspectos culturales que rodeaban a los metales cupro-arsénicos se pueden deducir de la manera y contexto en que se usaban. En la sociedad del Sicán Medio abundaban las piezas de aleación de cobre, desde cuencos hasta máscaras ceremoniales. Tenemos un ejemplo singular en ciertos objetos laminares en forma de I, a los que allí se denomina naipes. Presumiblemente se trata de una forma de dinero primitivo. Los naipes eran transportables, duraderos y su tamaño, forma, material y técnicas de manufactura estaban reglamentados. Hasta ahora sólo se han desenterrado en Lambayeque y en la región de Piura, más o menos en el límite de la zona dominada políticamente durante el período Sicán Medio. Algunas tumbas de privilegiados halladas en el santuario sicán contenían miles de naipes cuidadosamente amontonados, de diferentes tamaños.

En las tumbas señoriales, mayores, los objetos de cobre-arsénico yacían junto a otros hechos de tumbaga. A diferencia de los de cobre-arsénico, los adornos de tumbaga se fabricaban exclusivamente para los privilegiados. La tumbaga y otros metales preciosos

tenían una distribución limitada; sobre ellos se realizaban las representaciones más explícitas, detalladas y completas de los principales símbolos religiosos. Se montaban cuidadosamente a partir de piezas laminares y se decoraban con conchas e incrustaciones de piedra, lentejuelas, plumas y pinturas. Se cuentan entre las obras de arte más bellas que los sicanes realizaron durante su período Medio.

A diferencia de las tumbas de la clase superior del período Sicán Medio, las sepulturas encontradas cerca de los talleres de fundición del sector III —que pueden suponerse pertenecientes a trabajadores metalúrgicos chimúes e incas— son pobres en calidad y cantidad de ofrendas funerarias. Por el contrario, las tumbas subterráneas descubiertas en talleres de manufactura cercanos están mejor dotadas. Parece, pues, que quienes se ocupaban del trabajo de la fusión, duro, sucio e insano, tenían un rango social inferior que el de los artesanos forjadores.

Las teorías y opiniones actuales sobre la metalurgia antigua en el norte de Perú continúan todavía dejando el peso de la prueba en los objetos encontrados en tumbas. Para valorar la importancia que los instrumentos de aleación tuvieron en la vida cotidiana de los sicanes, necesitaremos excavar más viviendas. Entra dentro de nuestros proyectos investigar, mediante el estudio de los valles vecinos de Zaña y Jequetepeque, las variaciones regionales y temporales operadas en la metalurgia de las aleaciones de cobre. Tan sólo nos queda desear que los ladrones no hayan tenido oportunidad de "estudiarlos" primero.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANCIENT AMERICAN METALLURGY: FIVE HUNDRED YEARS OF STUDY. Warwick Bray en *The Art of Precolumbian Gold: The Jan Mitchell Collection*. Dirigido por Julie Jones. Weidenfeld & Nicolson, 1985.

PERCEPTION, PROCUREMENT, AND MANAGEMENT OF RESOURCES: ARCHAEOLOGICAL PERSPECTIVE. Izumi Shimada en *Andean Ecology and Civilization*. Dirigido por Shozo Masuda, Izumi Shimada y Craig Morris. University of Tokyo Press, 1985.

TRADITIONS AND STYLES IN CENTRAL ANDEAN METALWORKING. Heather N. Lechtman en *The Beginning of the Use of Metals and Alloys*. Dirigido por Robert Maddin. MIT Press, 1988.

THE ANCIENT METALLURGY OF COPPER. Dirigido por Beno Rothenberg. Londres, Institute for Archaeo-Metallurgical Studies, 1990.

La dispersión austronesia y el origen de las lenguas

Las lenguas austronesias del Pacífico se difundieron durante mil quinientos años a través de 10.000 kilómetros de costas y mares. Eran agricultores quienes impulsaban la expansión más vasta y rápida de la prehistoria

Peter Bellwood

Mucho antes de que se produjeran los grandes movimientos poblacionales registrados por la historia, muchas formas ancestrales de las familias lingüísticas actuales se habían difundido ya por vastas zonas del planeta. Se les llama familias porque sus miembros muestran indicios de un origen común. Sus nombres aluden a sus distribuciones étnicas y geográficas: indo-europea, afro-asiática, chino-tibetana y austronesia.

¿Por qué adquirieron tan amplia difusión estas familias lingüísticas? ¿Por qué no estaba cubierto el mundo, antes de que surgieran los primeros imperios históricos o fronteras coloniales, de un mosaico de lenguas independientes, como sería de esperar si las poblaciones iniciales de los humanos modernos y sus descendientes hubiesen permanecido siempre en las mismas regiones? Precisamente es la distribución de las lenguas lo que indica que la prehistoria humana tuvo que diferir bastante del simple quedarse en casa.

De las pautas que muestra el cambio lingüístico en los tiempos históricos se infiere que tal distribución prehistórica tuvo que ser el resultado de largos y complejos procesos de crecimiento demográfico y migración. Es sabido, por ejemplo, que la explicación de por qué se habla francés en Quebec, pero no en Maine, se halla en las vicisitudes del colonialismo del siglo XVIII. Aunque la historia también registra casos de comunidades que han adoptado las lenguas de sus vecinos sin por ello haber importado a éstos (así el inglés que hablan los escoceses en lugar del gaélico de sus antepasados), tal difusión no sirve para explicar por qué algunas lenguas saltan mares y ocupan continentes enteros, como es el caso del árabe, el inglés, el español o el ruso. Cuando una lengua se desplaza tan lejos de su cuna, la emigración, planeada o espontánea, desempeña siempre un papel decisivo.

Un episodio migratorio aislado basta para propagar una lengua, pero deberían requerirse varios de ellos para diversificarlo en una familia lingüística. Se ha comparado el proceso de expansión y diferenciación con la evolución biológica: una población ocupa diversos nichos, escindiéndose en subgrupos, cada uno de los cuales vuelve a servir de núcleo para ulteriores desarrollos.

Para hacer corresponder la diversificación inicial de las familias lingüísticas, e incluso a veces toda su actividad expansiva, con los restos arqueológicos hay que establecer una importante hipótesis teórica: la de que los lenguajes ancestrales de cada familia fueron diseminados inicialmente por poblaciones expansivas de agricultores hacia regiones donde no había cazadores-recolectores, o escaseaban.

La distribución actual de climas templados y tropicales en las latitudes medias de la Tierra se fue originando en los milenios siguientes al último retroceso glaciar del Pleistoceno, hace unos diez mil años, al aumentar el calor y la humedad. Por razones todavía no bien comprendidas, los habitantes de varias de estas regiones (suroeste de Asia, centro y sur de China, mesetas de Nueva Guinea, Centroamérica, oeste de Sudamérica) comenzaron a sacar partido de las nuevas condiciones ambientales desarrollando sistemas de producción de alimentos.

Los prehistoriadores suelen llamarlo la revolución neolítica. Desde un punto de vista arqueológico moderno, no parece poder hablarse de revolución, como opuesto a cambio gradual; salvo en determinados casos, de los que Oriente próximo y China sean quizá los mejor documentados. En otros sitios, como México o Africa central, el proceso pareció exigir un tiempo bastante más largo. Sea como fuere, en lo que no hay discrepancias es en su relevancia general: los humanos que podían producir su propio alimento, en vez de cazarlo o recolectarlo, estaban en condiciones de aumentar su número de forma espectacular y de establecer sociedades más complejas, sociedades que, sin duda, se expanderían por nuevos territorios llevando consigo todas o parte de sus economías de producción de alimentos.

Los grupos pioneros en el desarrollo de la agricultura sistemática debieron poder multiplicarse y extenderse durante mucho tiempo, en un mundo escasamente ocupado por recolectores. Les pondrían coto los ambientes

PETER BELLWOOD enseña prehistoria en la Universidad Nacional de Australia y ha escrito cinco libros de arqueología de la cuenca del Pacífico. Nació en Inglaterra y estudió en Cambridge, en cuya universidad se doctoró en 1980. Es secretario general de la Asociación de Prehistoriadores del Indo-Pacífico y responsable de su boletín anual. Ha realizado campañas por todo el sudeste de Asia y Polinesia, las últimas en las Molucas septentrionales.

1. LOS MARINEROS HAWAIANOS reviven los viajes épicos de sus antecesores polinesios, los más orientales de los pueblos de habla austronesia. Por el oeste, otras ramas la llevaron hasta Madagascar.

inadecuados, los desastres naturales o el tropezar con otros agricultores, pero no las poblaciones recolectoras, a las que no les resultaría difícil asimilar o reemplazar. Si, por el contrario, la mayoría de los grupos preexistentes ya hubiesen adoptado la agricultura por sí mismos, sería el proceso de difusión el predominante y el mundo habría presentado bastante más diversidad lingüística de la que había en los albores de la historia. Los recolectores poseían razones socioeconómicas de peso para resistirse a la agricultura, pues encontrarían extraño su ritmo estacional, pesado el trabajo que impone y opresivo su estilo de vida sedentario y congestionado. Los pueblos recolectores supervivientes nunca se vieron obligados a adoptar tal compromiso y, por lo menos hasta hace poco, no tuvieron que competir con los agricultores por terreno y recursos.

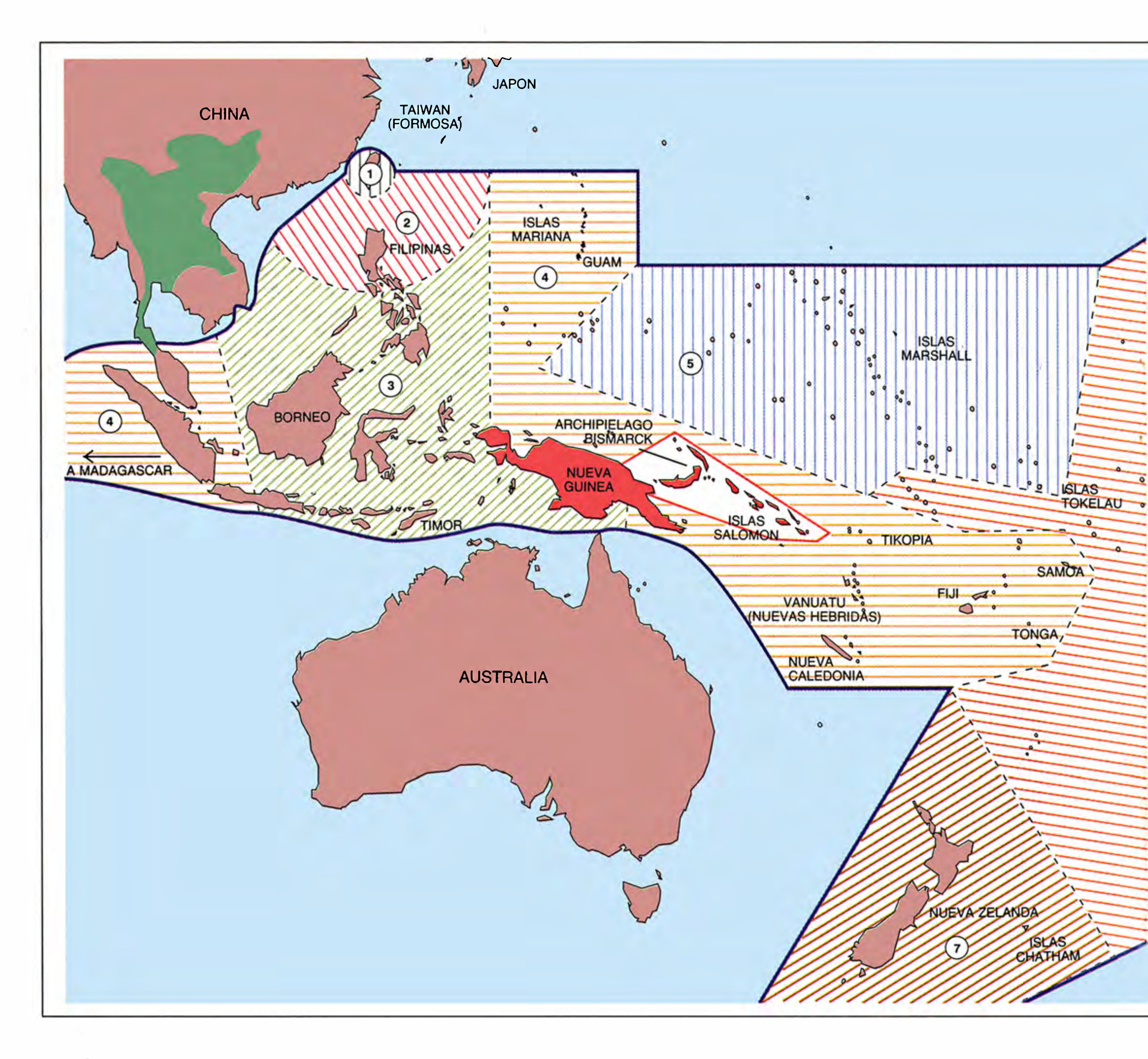
Conforme se expandían los agricultores, sus lenguas lo hacían con ellos. El resultado debería ser que las familias lingüísticas estuviesen centradas en regiones de invención agrícola. La hipótesis encaja bien con los datos conocidos sobre la evolución de la agricultura en China y Nueva Guinea, regiones ambas de temprano desarrollo agrícola y sede de numerosas familias lingüísticas.

Según revelan las excavaciones arqueológicas de las planicies de Papúa Nueva Guinea, hace por lo menos seis mil años que allí se cavaban surcos para regar, destinados quizás al cultivo de los tubérculos de taro. Tal presumible invención agrícola independiente podría haber ocasionado un crecimiento de población suficiente para que los hablantes de lenguas papúes se propagaran por extensas zonas de Nueva Guinea, hasta Timor y Halmahera (Molucas) por el oeste y las islas Salomón por el este.

Las revoluciones agrícolas de China parece que se produjeron en dos focos diferentes, si bien culturalmente relacionados. El uno, la cuenca del río Amarillo, presenció la domesticación del mijo silvestre hace unos ocho mil años; el otro, la cuenca del Yangtse, la del arroz hacia la misma época. Ambos cereales, junto con muchas otras plantas menores, exigirían limpieza sistemática de los campos y cultivo estacional. La capital importancia que rápidamente adquirieron en la dieta viene sugerida por las grandes cantidades de restos encontradas en pozos de almacenamiento y estratos habitados de los yacimientos arqueológicos.

Hace cinco mil años había asentamientos de cultivadores de arroz a todo lo largo de la costa oriental china y en las zonas norteñas de Vietnam, Thailandia y puede que India. Los restos arqueológicos incluyen conjuntos de artefactos que no dejan ninguna duda sobre el efecto arrollador que tuvo la nueva forma de vida. Por ejemplo, en Hemudu, pueblo de cabañas construidas sobre pilotes junto a la playa meridional de la bahía de Hangzhou en la provincia de Zhe-



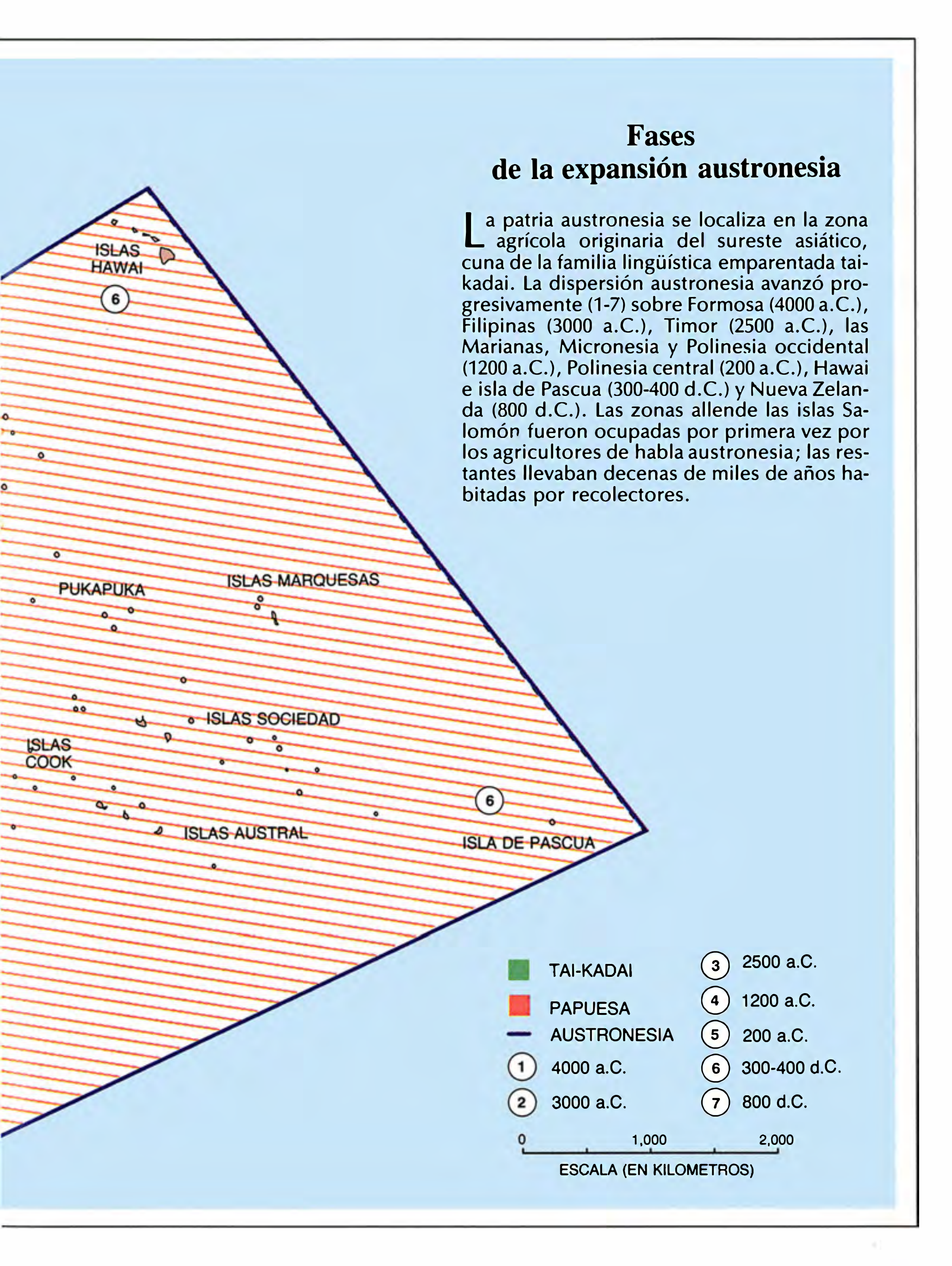


jiang hace siete mil años, se han encontrado cerámica, tejido de saco, cordelería, azadas de piedra, otros aperos de madera y hueso, indicios de carpintería y construcción de barcas, remos, husos para tejer, grandes cantidades de arroz almacenado y huesos de animales domesticados: cerdos, perros, gallinas, ganado vacuno y búfalos. No es la impedimenta de un recolector.

Sus dueños participaron en un episodio de evolución cultural que terminaría por influir sobre toda Asia oriental y el Pacífico. Una de sus consecuencias puede que comenzase mil kilómetros o más al sur de Hemudu, que fue donde parece se inició la extraordinaria expansión de las lenguas austronesias.

Esta familia lingüística era la más difundida del mundo antes del descubrimiento de América. Actualmente cuenta con más de doscientos millones de hablantes nativos en Taiwan, interior del mediodía de Vietnam, Madagascar, Malasia, islas Filipinas, Indonesia e islas del Pacífico, hasta Hawai y Pascua. Los datos arqueológicos de que se dispone apuntan a una expansión que comenzó por zonas habitadas, desde Taiwan a la Melanesia occidental, para continuar luego por territorios deshabitados hacia Madagascar, por un lado, e islas del Pacífico situadas al este de las Salomón, por otro.

Las pruebas más claras de encuentro con otras culturas preexistentes en algunos de estos territorios se hallan allí donde otras familias lingüísticas interrumpen la distribución austronesia: en Taiwan y Vietnam, por las expansiones china y vietnamita de épocas históricas, y en la Melanesia occidental, donde las familias lingüísticas papúes ocupan la mayor parte de Nueva Guinea, sectores de los archipiélagos Bismarck y Salomón y algunas islas de Indonesia oriental. Como ya se indicó, la extensión geográfica de estas lenguas papúes es probable que refleje el desarrollo independien-



Fases de la expansión austronesia

La patria austronesia se localiza en la zona agrícola originaria del sureste asiático, cuna de la familia lingüística emparentada tai-kadai. La dispersión austronesia avanzó progresivamente (1-7) sobre Formosa (4000 a.C.), Filipinas (3000 a.C.), Timor (2500 a.C.), las Marianas, Micronesia y Polinesia occidental (1200 a.C.), Polinesia central (200 a.C.), Hawai e isla de Pascua (300-400 d.C.) y Nueva Zelanda (800 d.C.). Las zonas allende las islas Salomón fueron ocupadas por primera vez por los agricultores de habla austronesia; las restantes llevaban decenas de miles de años habitadas por recolectores.

te de la agricultura en Nueva Guinea, algo que no ocurrió en las islas tropicales situadas al oeste de Asia sudoriental. En consecuencia, las lenguas austronesias de la Melanesia occidental aceptaron gran cantidad de términos y rasgos gramaticales de sus vecinas papúes, al igual que éstas lo hicieron de las primeras.

Estos intercambios, o préstamos, suministran datos para desentrañar la historia del lenguaje. Así, por medio de la lingüística comparada se puede inferir el orden de adopción de diversas palabras según las formas de variación de los sonidos. La construcción de modelos temporales de cambio fonético permite comprobar si las semejanzas existentes entre diversas lenguas reflejan préstamos u origen común. Las de este último grupo forman el conjunto emparentado, la materia bruta con la que los lingüistas reconstruyen el habla ancestral, o protolenguaje, de una familia.

Los mejores resultados se obtienen cuando hay muchas lenguas vivas con las que comparar o, si se trata de otras muertas, abundan los testimonios escritos. El grupo austronesio cumple el primer requisito, pero, por desgracia, carece de textos antiguos fuera de la esfera occidental de influencia histórica india. No obstante, pueden extraerse ya algunas conclusiones firmes, basadas exclusivamente en pruebas lingüísticas, sobre la patria familiar, las direcciones de su difusión ulterior y el universo cultural de sus hablantes.

Colocándose en el pasado más remoto posible, Paul K. Benedict formula la hipótesis de que la familia lingüística tai-kadai (que incluye thai y lao) junto con las lenguas austronesias forman la superfamilia austrotai. Postula una lengua o cadena de lenguas ancestral común de la superfamilia (el proto-austro-tai, abreviado PAT), que en alguna época se hablaría en el sur de China continental, y ha presentado cierto número de reconstrucciones léxicas importantes del PAT, como los términos para campo, campo inundado (para arroz o taro), jardín, arado, arroz, caña de azúcar, ganado, búfalo, hacha y canoa.

Hasta ahora no se ha presentado ninguna objeción convincente contra su teoría, lo que obliga a considerar seriamente la posibilidad de que la expansión de la familia austro-tai se iniciase en comunidades neolíticas costeras, cultivadoras de arroz, al sur de China. Hay abundantes pruebas arqueológicas de la existencia de grupos semejantes hace entre ocho mil y cinco mil años.

Pasando a uno de los descendientes del austro-tai, el austronesio, Robert Blust, de la Universidad de Hawai, ha reconstruido un árbol genealógico de sucesivos protolenguajes, iniciado con el proto-austronesio (PAN). Cree que la expansión geográfica se inició en Taiwan (patria de las lenguas astronesias más antiguas, PAN incluido), para abarcar luego las Filipinas, Borneo y Célebes, y bifurcarse, con una rama que iría por el oeste hasta Java y la otra, por el este, hasta Oceanía a través del archipiélago Bismarck.

Podría, desde luego, añadir gran cantidad de detalles lingüísticos a este esquema tan escueto, pero voy a limitarme a algunas consecuencias de gran alcance histórico y cultural. Parece como si, en el estadio PAT, algunos colonizadores de economía agrícola hubiesen pasado del continente chino a Taiwan atravesando el estrecho de Formosa. Aquí fue donde se desarrollaron el lenguaje o lenguajes austronesios arcaicos; tras varios siglos, algunos de sus hablantes se aventuraron por primera vez a marchar hacia Luzón y el resto de las Filipinas, paso que escindió el austronesio en sus dos subgrupos principales, el formosano y el malayo-polinesio (MP). El vocabulario PAN

previo a la escisión refleja, sin embargo, una cultura de economía bien adaptada a las latitudes tropicales marginales, cultivadora de arroz, mijo y caña de azúcar, que había domesticado perros y cerdos y usaba canoas.

Ulteriores movimientos colonizadores atravesaron las Filipinas y llegaron a Borneo, Célebes y Molucas e hicieron que el subgrupo malayo-polinesio terminase por dividirse en diversas ramas de orden inferior: occidentales y centro-orientales. La ramificación del malayo-polinesio centro-oriental tuvo que ocurrir en las Molucas o en las islas Sonda meridionales, mientras que el MP oriental incluye todas las lenguas austronesias del Pacífico, salvo algunas de las zonas occidentales de Micronesia. El proto-malayo-polinesio (PMP), quizá hablado en los territorios que bordean el mar de Célebes, tiene gran interés, pues su vocabulario reconstruido contiene indicadores económicos tropicales que no aparecen en el estadio protoaustronesio, anterior en el tiempo y más boreal. Taro, árbol del pan, banana, ñame, sagú y coco son algunos de ellos. El vocabulario PMP conserva también términos para cerámica, canoas a vela y diversos elementos de casas de madera.

Por sí solo, el registro lingüístico nos informa de que los pueblos de habla austronesia, que eran agricultores y tripulantes de canoas, terminaron por colonizar todas las regiones actualmente ocupadas por sus descendientes lingüísticos, de Madagascar a la isla de Pascua y de Taiwan a Nueva Zelanda. El registro arqueológico, que es nuestro próximo objetivo, nos permitirá situar esta dispersión en el tiempo con más detalle.

Hace treinta mil años, e incluso puede que cincuenta mil, los recolectores ya habían extendido sus dominios por vía marítima hacia el este, llegando a Célebes, Australia/Nueva Guinea (unidas entonces por una lengua de tierra), Nueva Irlanda y las islas Salomón septentrionales. Para alcanzarlas se requerían trayectos marítimos de unos 65 kilómetros, los primeros de este tipo registrados en la prehistoria. Los colonizadores fueron probablemente los antepasados directos más cercanos de los modernos aborígenes australianos y de los pueblos de Nueva Guinea, en especial de los de los altiplanos interiores. Aportaron también parte de su acervo genético a los isleños melanesios costeros desde Nueva Guinea hasta Fiji (grupos que posteriormente se mezclaron con los hablantes austronesios). Las lenguas de varias familias australianas y papúes descienden también probablemente de las lenguas de estos primeros pobladores.

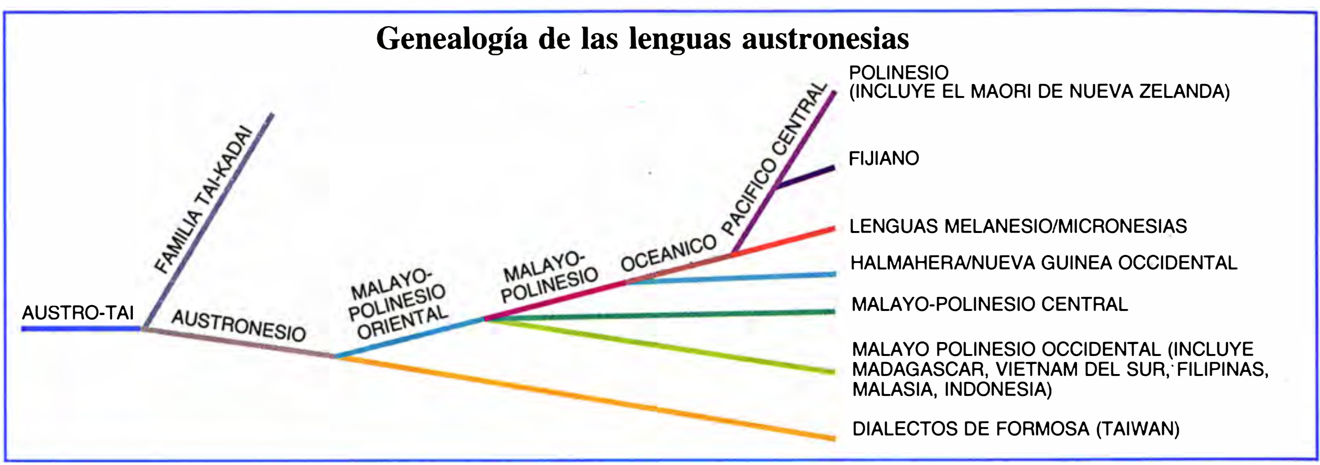
No puede probarse de modo concluyente que los habitantes de un yacimiento o los miembros de una cultura prehistóricos hablasen una lengua determinada. Pero hay pruebas indirectas que por lo menos refuerzan tal posibilidad. Los vocabularios PAN y PMP reconstruidos ponen ante nosotros sociedades agrícolas que cultivaban arroz, modelaban la arcilla, vivían en casas de madera bien entibadas y criaban animales domésticos. Restos materiales directos de todos estos tipos se encuentran en los registros arqueológicos de las islas del sureste asiático y (sin el arroz) del Pacífico occidental. La aparición de los artefactos es bastante súbita en yacimientos muy separados que han sido

Proto-austronesio (PAN) y derivados modernos

	PAN (RECONSTRUIDO)	RUKAI (TAIWAN)	TAGALO (FILIPINAS)	FIJIANO	SAMOANO	RAPANUI (ISLA DE PASCUA)
DOS	DUSA	DOSA	DALAWA	RUA	LUA	RUA
CUATRO	SEPAT	SEPATE	ĀPAT	VĀ	FĀ	HĀ
SEIS	'ENEM	ENEME	ĀNIM	ONO	ONO	ONO
PAJARO	MANUK	—	MANOK	MANUMANU	MANU	MANU
OJO	MACA	MACA	MATA	MATA	MATA	MATA
OIDO	CALINGA	CALINGA	TĒNGA	DALINGA	TALINGA	TARINGA
CANOA	AWANG	AVANGE	BANGKA	WAGA	VA'A	VAKA
AZUCAR	TEBUS	CUBUSU	TUBO	DOVU	TOLO	TOA
PIOJO	KUCUH	KOCO	KŪTO	KUTU	'UTU	KUTU

FUENTE: *Malcolm Ross, Universidad Nacional de Australia*

2. SEMEJANZAS LEXICAS entre las lenguas austronesias indican su procedencia de un antepasado común, reconstruido por los lingüistas. No todas las raíces sobreviven en las lenguas derivadas; por ejemplo, la rukai usa un término distinto para pájaro.



FUENTES: *Paul K. Bènedict y Robert Blust*

excavados, de edades comprendidas entre 6000 y 3500 años.

El registro arqueológico neolítico de Taiwan empezó a depositarse hace unos 6000 años. Sus elementos iniciales son de tipo chino meridional, puede que traídos originariamente por pequeños grupos de colonos agrícolas que cruzaran el estrecho de Formosa desde Fujian. Los artefactos típicos, que se encuentran en abundancia en la isla y datan de este período en adelante, incluyen cerámica marcada con cordel, azuelas y rascadores de piedra pulida, puntas de flecha de pizarra y husos de arcilla cocida. También hay indicios de arroz y el análisis del polen habla de tala de bosques interiores.

Hace entre 5000 y 4500 años, restos arqueológicos claramente relacionados con los anteriores se extendieron por las zonas costeras y por las interiores que eran favorables de Filipinas, Célebes, norte de Borneo y (junto con los cerdos) muy hacia el sureste, hasta Timor. La investigación de la historia polínica de los altiplanos de Java occidental y Sumatra indica una actividad de tala de bosques bastante intensa hace unos 3000 años, si no anterior, para obtener terrenos agrícolas.

El análisis radiocarbónico de cerámica hallada en un yacimiento de Sarawak occidental, del Borneo malayo, acaba de arrojar una edad de unos 4000 años. El elemento analizado son las glumas de arroz que se añadían a la arcilla como reforzador, lo mismo que se añade paja a los adobes. En las latitudes ecuatoriales de Indonesia se produjo un abandono del cultivo de arroz a favor de una mayor dependencia de los frutos tropicales y los tubérculos listados antes en el vocabulario PMP. Los cereales no llegaron a introducirse nunca en las islas del Pacífico, con la posible excepción del arroz en las Marianas.

Así pues, los colonos agrícolas se habían extendido a lo largo de un milenio desde Taiwan hasta los confines occidentales de Melanesia hace unos 4000 años. El proceso de dispersión hacia la Polinesia occidental, donde se han encontrado vasijas del tipo Lapita, fue todavía más rápido. La mayoría de los hallazgos se dan en emplazamientos costeros de islas pequeñas de la Melanesia occidental, que abarcan una distancia de unos 5000 kilómetros, desde las del Almirantazgo, por el oeste, a Samoa en el este. Por último, y es quizá lo más impresionante, se produjo la conquista de las vastas zonas de Polinesia situadas más allá de Samoa, lo que sucedió hace entre 2500 y 1000 años.

Podemos ahora recapitular los aspectos arqueológicos fundamentales de la primitiva dispersión austronesia y sus posibles razones. Colonos agrícolas de habla austronesia se extendieron, durante un período de unos mil quinientos años, desde su región agrícola nativa en el sur de China y Taiwan por unos 10.000 kilómetros de costas y mares, desde las islas del Asia suroriental hasta los límites occidentales de Polinesia. Fue la colonización más amplia y rápida de toda la prehistoria. En sus fases iniciales no se adentraba en las grandes islas y sólo pareció encontrar una sólida resistencia cultural en Melanesia occidental, donde la arqueología enseña que se había producido otra revolución agrícola anterior e independiente.

También documenta la sorprendente pericia marinera de los primitivos austronesios. Se han encontrado lascas de la afilada y vítrea obsidiana que las gentes de Lapita extraían de yacimientos junto a Talasea (Nueva Bretaña) en asentamientos, de unos 3000 años de antigüedad, separados por más de 6500 km, desde el norte de Borneo a Fiji, lo que quizá convierte a la obsidiana de Talasea en la materia prima mejor y más ampliamente distribuida de todo el Neolítico. No sorprenderá, pues, que los descendientes de estos colonos lapitas pudiesen hacer los viajes individuales más largos de la prehistoria humana, en los que llevaron personas, animales y plantas a los confines de Polinesia durante el primer milenio de nuestra era.

El desarrollo de la agricultura constituyó la raíz de la expansión austronesia, pero terminó implicando bastante más que la simple emigración de un grupo de agricultores deseosos de tierras. Tras complejos procesos de asimilación e interacción entre poblaciones distintas, adaptaciones económicas a medios cambiantes y cinco mil años de innovación y aventura por todo el mundo austronesio, resultaría imperdonable cualquier consideración simplista de un origen chino o taiwanés de todos los austronesios modernos, a pesar de lo cual la expansión inicial de un grupo de pueblos lingüísticamente relacionados desde una patria neolítica constituye un apartado fundamental de la cuestión austronesia.

Consideremos más de cerca esta patria agrícola, comprendida entre el norte continental de Asia sudoriental (incluida Taiwan) y la cuenca del río Amarillo. Si bien las lenguas chinas de la familia chino-tibetana llegaron a dominar la zona en los últimos 2000 años, todavía hay hablantes de lenguas pertenecientes a no menos de otras cuatro familias: austroasiática (que incluye la vietnamita,

khmer, lenguas mundaicas de India y ciertas lenguas malayas), miao-yao, tai-kadai y la austronesia de Taiwan. Con las únicas excepciones de Asia sudoccidental, Melanesia occidental y zonas de Africa central, no hay otros territorios de tamaño comparable en el viejo mundo que presenten tanta diversidad lingüística, y cada excepción resulta ser un núcleo agrícola primigenio.

También es muy significativo observar que es en esta misma región donde la diversidad interna entre familias del Asia oriental alcanza su máximo. Es lo que cabría esperar si no fuese sólo una patria agrícola sino también lingüística. Las diferencias mayores entre las lenguas de una familia suelen derivar de las escisiones más antiguas, que son las acaecidas cerca de donde se hablaba la protolengua.

La división más profunda de la familia austronesia es la que se da entre los subgrupos formosano y malayopolinesio, que se separaron antes, en Taiwan y las Filipinas. De manera semejante, la diferenciación interna de las familias tai-kadai y miao-yao es mayor en el sur de China. La cosa está menos clara en los casos austroasiático y chino-tibetano, pero, incluso aquí, los vocabularios reconstruidos y las divisiones internas apuntan con fuerza hacia una patria en Asia oriental.

Nos encontramos, pues, ante algo parecido a un botón floral, analogía usada por Andrew y Susan Sherratt, del Museo Ashmoleo de la Universidad de Oxford, para describir la radiación de lenguas de otra patria agrícola, el suroeste de Asia. Esta zona incluye, en sentido amplio, desde la Europa suroriental y el Oriente próximo hasta el noroeste de India, y es el asiento de los supuestos lugares de origen de las familias lingüísticas indo-europea, caucásica, elamo-dravídica y, quizás, afro-asiática. También originó algunas lenguas aisladas, como el sumerio, que sólo nos han llegado en forma escrita. Colin Renfrew ha analizado los orígenes del indo-europeo en el sudeste de Asia.

Procesos similares parecen haber operado en los altiplanos de Nueva Guinea (como ya hemos comentado en relación con las familias papúes) y en la zona de innovación agrícola temprana del Africa subsahariana, que atraviesa el continente desde la costa tropical occidental hasta Etiopía y entre los grados 5 y 15 de latitud norte, aproximadamente. Es patria de las familias nilo-sahariana y niger-kordofaniana. Esta última incluye el subgrupo bantoide, que se extendió por el este y el sur de Africa, junto con la colonización agrícola, durante los últimos 2500 años, ocupando regiones pertenecientes antes a los recolectores khoisan.

Estos ejemplos refuerzan dos hipótesis: que una patria agrícola temprana debería ser una zona con un número de familias lingüísticas supervivientes superior a la media; y que todas estas familias deberían tener sus centros de mayor diversidad genética dentro de la zona. Estas correlaciones no tienen por qué ser absolutas y, en algunos casos (como los de Turquía o buena parte del sur de China), podrían resultar enmascaradas por sustituciones lingüísticas acaecidas posteriormente, pero ambas reflejan pautas resultantes de la expansión simultánea de los agricultores y sus lenguas.

Muchos otros arqueólogos y lingüistas han hecho propuestas previas de hipótesis favorables a tales expansiones conjuntas, sobre todo en los casos de Africa y Asia occidental. De todas formas, yo no pretendo que la expansión agrícola inicial explique por completo la geografía de las familias lingüísticas. Su inaplicabilidad a las poblaciones recolectoras tradicionales, como los aborígenes australianos, resulta patente, y es un hecho histórico que se han producido muchos reemplazos y expansiones lingüísticas en tiempos posneolíticos.

Pero sí mantengo que, cuando la interacción de los primeros agricultores con los recolectores no puede explicar la distribución de lenguas, hay que buscar otra parecida. Siempre que un lenguaje reemplaza a otro mediante colonización, sus hablantes tienen que disfutar de algún tipo de ventaja, lo que sigue siendo tan cierto en el presente como lo era hace 10.000 años, cuando bandas dispersas de gentes comenzaron a cultivar la tierra.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AUSTRO-THAI: LANGUAGE AND CULTURE, WITH A GLOSSARY OF ROOTS. Paul K. Benedict. HRAF Press, 1975.

PREHISTORY OF THE INDO-MALAYSIAN ARCHIPELAGO. Peter Bellwood. Academic Press, 1985.

ARCHAEOLOGY AND LANGUAGE: THE PUZZLE OF INDO-EUROPEAN ORIGINS. Colin Renfrew. Cambridge University Press, 1987.

THE AUSTRONESIAN HOMELAND: A LINGUISTIC PERSPECTIVE. Robert Blust en *Asian Perspectives*, vol. 26, n.° 1, págs. 45-67; 1988.

¿TE LLEVO?

Gary Stix





En la última generación de aviones, los ordenadores pueden tomar el control de casi todas las fases del vuelo

Con una alineación casi perfecta, el tren de aterrizaje trasero del Boeing 737 tomó tierra en la pista virginiana de Wallop Island. El morro, aún erguido, avanzaba suave y majestuosamente por la pista, a un metro escaso de la banda central. Lee Person, piloto de pruebas de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA), y su copiloto, Cary R. Spitzer, estaban satisfechos. Fuera, bajo el sol otoñal, retozaba un zorro rojo; ellos no podían verlo, puesto que el habitáculo en que se encontraban carecía de ventanas y no ofrecía otras vistas que una batería de pantallas de ordenador.

Poco importaba que los pilotos volaran sin visibilidad, pues estaban allí como pasajeros. El mérito de la operación le correspondía al microprocesador de 16 bits del sistema de navegación inercial del avión y a cuatro satélites, de un grupo de dieciséis, que describen una órbita terrestre cada doce horas. Para guiar el aterrizaje del birreactor de pruebas de la NASA, su ordenador de navegación y aterrizaje automáticos había estado utilizando las radioseñales emitidas por esa flotilla de satélites (el Sistema de Posicionamiento Global). Otros dos pilotos se mantenían vigilantes en la cabina habitual, por si hubiese sido necesario intervenir.

Los aterrizajes guiados por satélite marcan un hito más en un abanico de técnicas que permiten a los aviones volar prácticamente solos. El pilotaje, la navegación y el aterrizaje automáticos se han convertido en actividades ruti-

EL AIRBUS A320, de cabina automatizada en extremo merced a ordenadores de control de vuelo, ha desatado la polémica sobre la medida en que el gobierno de la nave deba repartirse entre ella y el piloto. En Miami hay un simulador de vuelo que reproduce esta cabina.

narias de la aviación comercial y expresiones tales como "pilotar por cable" ("fly-by-wire") o "vista al frente" (HUD, "heads-up displays") son ya corrientes en el argot aeronáutico. Puede que otras aún más exóticas vengan a complementarlas: los pilotos quizá reciban pronto la ayuda de sistemas expertos informatizados o maniobren observando imágenes de vídeo o tridimensionales del mundo exterior.

El control del tráfico aéreo recibirá su propia dosis de ayuda informática. Su tantas veces demorada renovación podría acabar consistiendo en una complicada coreografía de ordenadores situados en tierra y aire, cuyo saber combinado decidiera las prioridades requeridas para gestionar los bulliciosos espacios aéreos en torno a las grandes metrópolis.

Los principales fabricantes de aviones insisten en que los ordenadores que forman parte de las aeronaves de la última generación las hacen más seguras, más eficaces en el uso de combustible y, en general, más fáciles de gobernar que sus antecesoras. En ellos tienen puestas sus esperanzas para reducir la posibilidad de errores humanos, desencadenantes de unos dos tercios de los accidentes aéreos comerciales. El persistente incremento del tráfico puede hacer crecer el número de accidentes, de modo que hacia el año 2005 podría producirse uno grave cada dos semanas, según piensan con inquietud los responsables de Boeing.

Conforme la automatización va recortando el número de tripulantes, ¿qué papel le queda al aviador de mirada de acero? El temible bombardero B-36 de los años de la posguerra llevaba una tripulación de 15 miembros, incluido un mecánico capaz de introducirse por las alas para hacer reparaciones. Los modelos recién salidos de los hangares, bombarderos o no, se bastan con un piloto y un copiloto; los microprocesadores de los sistemas de navegación y supervisión han sustituido en buena medida al mecánico.

Quienes viven la aviación, sean pilotos de Jumbo o directivos de aerolíneas, sostienen que los venerables capitanes de voz meliflua no pueden acabar convertidos en meros pasajeros a sueldo o en aburridos observadores de pantallas. La consideración multidisciplinar de los factores humanos es el recurso a que se ha acudido para asegurar que los planes de automatización no dejen a los pilotos fuera del "bucle de control", pues todavía no hay nada equiparable al ser humano en lo que respecta al reconocimiento de imágenes y al enfrentamiento con lo imprevisto.

Automatización de los aviones

	Antes de la I guerra mundial	Entre las dos guerras mundiales
CABINA	• Anemómetros miden la velocidad aerodinámica • Altímetros barométricos • Brújulas magnéticas	• La velocidad aerodinámica se mide con indicadores de Pitot (tubos huecos apuntados contra el viento) • Giróscopos y acelerómetros para los giros • Giróscopos para la actitud vertical y horizontal
CONTROL DEL VUELO	• Cables y varillas mueven las superficies de control del vuelo en alas y cola	• Aletas aerodinámicas ayudan el movimiento de las superficies de vuelo • Pilotos automáticos mantienen la actitud
NAVEGACION	• Balizas luminosas	• Radiobalizas que transmiten en Morse para indicar cuándo se ha salido de su trayecto previsto un avión


AEROPLANO DE WRIGHT


LOCKHEED VEGA

FUENTE: *Myron Kayton*

Antes de Kitty Hawk

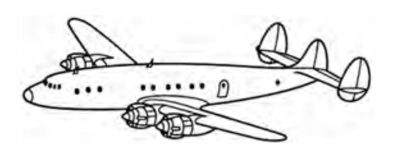
El inexorable ritmo de la automatización aeronáutica es anterior al 17 de diciembre de 1903, el día en que los hermanos Wright se remontaron en el aire cerca de Kitty Hawk (Carolina del Norte). En 1891, Hiram Maxim, inventor de la ametralladora, patentó un mecanismo giroscópico para "mejorar la estabilidad" de su máquina voladora a vapor, de cuatro toneladas, mediante el ajuste de las superficies de vuelo; el artefacto logró separarse del suelo por breves instantes, pero nunca voló.

La seguridad de los aviones fue mejorando paulatinamente gracias a los instrumentos y sistemas de gobierno que empezaron a llenar los puestos de mando con "pilotos automáticos" e instrumentos de "vuelo sin visibilidad", como el horizonte artificial. Aunque permitían mantener el avión recto y horizontal sin intervención del piloto al atravesar nubes densas, todavía era la tripulación quien conducía.

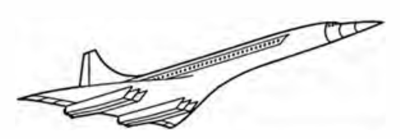
Las cosas empezaron a cambiar a comienzos de los años ochenta con la aparición, en los aviones comerciales, de los que ahora son modestos microprocesadores de ocho y dieciséis bits. De pronto, los ingenieros podían incorporar capacidad de decisión a los mismos aviones con facilidad y economía, meta perseguida desde entonces con verdadero empeño. Los primeros de una nueva generación de aviones "inteligentes" fueron los Boeing 757 y 767 y el Airbus A310, del consorcio europeo Airbus Industrie, que pueden acometer la tarea abstracta de navegar con precisión a cualquier lugar del mundo al tiempo que mantienen una vigilancia electrónica implacable sobre los circuitos hidráulicos y demás sistemas mecánicos.

Con la aparición del Airbus A320, en 1988, la automatización aeronáutica dio un paso al frente. Se trata de un aparato muy refinado, cuyos ordenadores de cabina dictan al piloto, en algunos aspectos, cómo debe manejarlo. Si se empuja la palanca de mando a uno u otro lado, los ordenadores dejan que el avión se ladee a derecha o izquierda, pero sólo hasta cierto punto. Los programas tejen una especie de capullo electrónico alrededor de la aeronave impidiéndole superar sus límites estructurales. "La mayoría de los pilotos no traga esta característica del A320", afirma Samuel Don Smith, capitán de Boeing 737 de Delta Airlines y miembro del comité de actuación humana de la Asociación de Pilotos de Aerolíneas, el principal sindicato de pilotos estadounidenses. A su modo de ver, la tripulación de un avión debe tener la

Entre 1945 y 1965	Entre 1965 y 1980	Desde 1980 hasta hoy
• Indicadores analógicos de velocidad y altitud • Indicadores de rumbo por radio • Radio-altímetros • Radares meteorológicos • Avisadores de combustible, temperatura y estado del tren de aterrizaje	• Un director de vuelo mecánico guía los movimientos de la palanca de mando, el timón de dirección y otros mandos • Ordenadores y pantallas digitales muestran la situación de los sistemas hidráulico, eléctrico, etc.	• Visualizadores electrónicos con niveles de información múltiples • Controles de palanca lateral • Visualizadores de mapas móviles • Sistemas anticolisión • Sistemas de gestión del vuelo
• La velocidad y el rumbo se mantienen con pilotos automáticos • Calculadoras analógicas de la estabilidad del vuelo	• Un sistema hidráulico de "pilotaje por aceite" ayuda a mover las superficies de vuelo • Sistemas de aterrizaje automático	• Ordenadores digitales de "pilotaje por cable" envían instrucciones a las superficies de vuelo a través de una red de cables eléctricos
• Radiobalizas omnidireccionales • Sistemas de aterrizaje instrumental guían al avión en sus aproximaciones a tierra	• Sistemas de navegación inercial calculan la posición del avión mediante acelerómetros y giróscopos	• Sistema de posicionamiento global vía satélite • Sistemas de aterrizaje por microondas guían al avión en sus aproximaciones curvas



LOCKHEED CONSTELLATION



CORCORDE



AIRBUS A320

posibilidad de tomar cualquier medida, incluso la de forzarle más allá de sus límites, cuando va derecho a chocar contra una montaña u otro avión.

Los fabricantes aducen, por su parte, que el malestar que sienten los pilotos ante los copilotos electrónicos está más que compensado por lo que se gana en seguridad. Algunos de los aviones más recientes y más automatizados de Boeing, los 757 y 767, han tenido un único accidente en casi cuatro millones de vuelos realizados entre ambos, frente a un accidente por cada 200.000 vuelos aproximadamente del Boeing 707, que es un avión de los años cincuenta.

Aun aplaudiendo la extraordinaria fiabilidad mecánica de los modernos reactores comerciales, la comunidad aeronáutica ha comenzado a preocuparse por lo que pilotar un avión que vuele por sí mismo pueda representar para unos profesionales que se enorgullecen de su sangre fría en las situaciones más difíciles. Se teme que pueda llegarse a automatizarlo todo tanto, que poco o nada le quede por hacer a la tripulación.

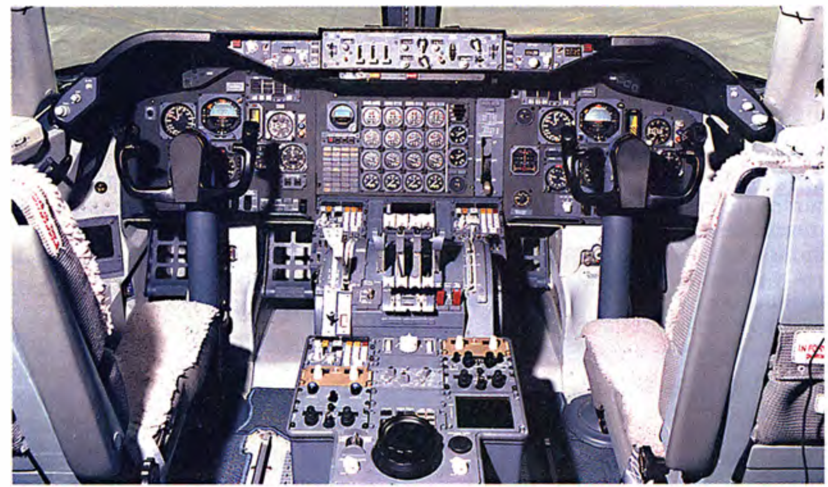
Y hay razones para esa reticencia. El año pasado Airbus tomó la insólita medida de editar un aviso que prevenía a los capitanes contra el exceso de confianza al manejar su avión más reciente, el A320. Según Bernard Ziegler, vicepresidente de la compañía, "se nos metió en la cabeza que algunas tripulaciones pensaban que llevaban a Dios con ellos al pilotar nuestro avión. Y no es así. Hemos construido una aeronave muy fácil de gobernar, pero siguen rigiendo las leyes de la física. Si no se lleva la energía suficiente para sobrevolar un obstáculo, se estrellará uno contra él".

Por desgracia, eso fue exactamente lo que le sucedió el 14 de febrero de 1990 a un A320 de Indian Airlines cuando hizo lo que se conoce con el eufemismo de aproximación controlada al suelo. El accidente, que registró 92 muertos, ocurrió durante una aproximación de aterrizaje con los motores en vacío, posición ésta del mando automático de gases que se emplea para realizar descensos cuando se está a gran altura, pero que se supone no debe utilizarse nunca para aterrizar. Casi dos años antes, durante una exhibición aérea en Francia, hubo otro accidente a baja velocidad y baja altitud en el que murieron tres personas.

A raíz de ellos, Airbus cambió la programación del mando automático de gases para impedir que la velocidad descienda más allá de un mínimo autorizado y estableció clases de prevención contra el exceso de confianza, que se imparten diariamente desde las cinco de la mañana hasta las dos de la madrugada del día siguiente, en su centro de entrenamiento situado en las afueras del aeropuerto de Miami.

La preparación contra el exceso de confianza en los sistemas de los aviones forma parte de la que reciben todos los nuevos pilotos de A320 en los simuladores de vuelo del centro, dos de los cuales reproducen el movimiento de un avión mientras vuela y un tercero es estático. Los simuladores, incluso los dotados de movimiento, presentan la apariencia exterior de contenedores de equipajes, por lo que todo el mundo les llama "cajas". Pero su interior es tan parecido a un avión real en pleno vuelo que algunos pilotos que hacen en él su entrenamiento reciben el certificado para pilotar el A320 sin que nunca hayan hecho despegar de verdad a este birreactor para 150 pasajeros.

Este videojuego tridimensional de doce millones de dólares (casi un tercio del precio de un avión real) reproduce la "cabina de vidrio" del A320. Sus tubos de rayos catódicos, de colores centelleantes, suplantan a las filas y filas de redondos instrumentos electromecánicos existentes en modelos más antiguos, como el Boeing 727, quintaesencia de los aviones de pasaje de los años sesenta, al que se pretende que el A320 sustituya. Palancas de mando instaladas a izquierda y derecha del tablero de




1. CABINA DEL BOEING 747-200, avión de los años setenta; está equipada con un tablero de indicadores circulares clásicos, que muestran la altitud, la velocidad aerodinámica, la actitud, el rumbo y la velocidad de ascenso, entre otros parámetros, lo que permite "volar a ciegas".

instrumentos evocan a los cazas militares, frente a los timones de rueda habituales en otros reactores comerciales.

En el simulador, Jerry Wolfe, antiguo capitán y actual instructor de vuelo de la compañía America West, está preparando a dos pilotos veteranos que desean hacerse con el diploma de instructores. Wolfe se sienta detrás de sus alumnos en "Cactus 1" (el indicativo de llamada para la aerolínea con base en Phoenix) y desempeña a la vez los papeles de instructor y controlador de tráfico aéreo.

Tiene ante sí el cuadro de mandos de un ordenador que le permite programar diversas situaciones de entre las más temidas por los pilotos; por ejemplo, fuego en un motor durante el despegue. En el menú que se le ofrece para vientos laterales, una opción reza simplemente "Dallas", tremendo recordatorio del estado del viento que, en agosto de 1985, derribo un avión de pasajeros de Delta. Wolfe afirma que en dos o tres temporadas con este simulador ha tenido más emergencias que en sus 31 años de piloto.

Durante una de las sesiones, hallándose en algún punto del espacio aéreo de Washington, D.C., Wolfe le dice a Roy Taylor, piloto de Cactus 1, que tire a fondo de la palanca de mando. A medida que el morro va apuntando hacia arriba, el avión comienza a perder sustentación. Entonces, una voz mecánica y sintética entona: "STALL, STALL, STALL" (pérdida). Cactus 1 acaba de hacer una incursión peligrosa fuera de lo que el fabricante llama envolvente de vuelo.

Estas protecciones programadas, que limitan las actuaciones de los pilotos, son posibles porque el A320 es el primer avión civil en que los dispositivos mecánicos han sido completamente sustituidos por controles de pilotaje digitales por cable (si bien posee un rudimentario sistema mecánico subsidiario). En sus predecesores, el cambio de posición de las superficies móviles de alas y cola, que determinan la maniobra del aparato, se realiza a través de un enrevesado sistema mecánico de cables, varillas y poleas, accionados servohidráulicamente, mediante el que se conectan a los mandos del piloto (o del piloto automático).

En el A320, por el contrario, los movimientos que hace el piloto con la palanca se envían a los cinco ordenadores de control de vuelo, que calculan cómo hacer minúsculos ajustes en los alerones u otras superficies del aparato. Las instrucciones resultantes se transmiten, a través de una red de cables eléctricos, a los actuadores hidráulicos instalados en alas y cola, quienes efectúan los movimientos reales.

Los ordenadores no impiden que el piloto trate de forzar la envolvente, pero el avión reacciona y lo contrarresta; poseen lo que los especialistas en control de vuelo llaman "autoridad total". Wolfe tuvo que desconectar dos ordenadores para hacer entrar en pérdida al avión, acción que suele estar prohibida por los manuales de vuelo porque afecta negativamente a su maniobrabilidad.

Aunque algunos pilotos toman a mal tal subordinación a los ordenadores, los técnicos de Airbus sostienen que la envolvente de vuelo les permite actuar sin titubeos hasta los límites de las posibilidades del avión; así, por ejemplo, con viento lateral, pueden tirar a fondo de la palanca para encabritar el aparato sin riesgo de bandazos que le hagan entrar en una pérdida fatal.

Sea como fuere, hacia la mitad del presente decenio puede que resulte difícil encontrar un avión carente de controles de este tipo. Boeing y McDonnell Douglas proyectan incluir protecciones informatizadas semejantes en sus próximos aviones, el 777 y el MD-12, aunque los pilotos tendrán la potestad de anularlas en caso necesario.

Los aviones militares, que comenzaron a utilizar sistemas híbridos de pilotaje por cable y mecánico hace más de veinte años, han convertido el vuelo controlado por ordenador en un elemento básico de su diseño. Los más recientes (el bombardero B-2 Stealth, el caza F-117 Stealth y el prototipo de caza táctico avanzado, que ha de reemplazar al F-15, los tres de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos) emplean tres o cuatro procesadores de control de vuelo y se fabrican, además, sin ningún sistema subsidiario. Si falla el sistema eléctrico y no se activa ningún generador de reserva, el piloto o salta en paracaídas o cae con el avión.

Estos aviones son intrínsecamente inestables y sus sistemas informáticos producen unas envolventes de vuelo que los mantienen en el aire en condiciones que pocos pilotos podrían dominar. Para una exhibición, McDonnell Douglas y la NASA cargaron en los ordenadores de un F-15 un programa que simulaba la pérdida parcial de la cola por efecto de un misil o de fuego antiaéreo. Sin el concurso informático, el piloto tenía que esforzarse lo indecible para mantener la horizontalidad del vuelo y el aparato le parecía tan inseguro que no quiso hacer maniobras de cabeceo y balan-





2. EN LOS AÑOS OCHENTA, el puente de mando del Boeing 747-400 (*izquierda*) ha reducido en casi dos tercios los instrumentos que podían verse en su predecesor, el 747-200. El visualizador de vuelo primario (*derecha*) ha reemplazado casi por completo al tablero de "vuelo sin visibilidad".

ceo. Al activarse la parte de "autorreparación" del programa, los ordenadores usaron el resto de superficies disponibles para compensar los desperfectos de la cola. Una imagen proyectada sobre el parabrisas mostraba una marca luminosa dentro de un pequeño recuadro, cuyos movimientos, relacionados con los de la palanca de mando, señalaban los límites de gobernabilidad del avión.

El puente de mando de vidrio

Donde más se advierte que los aviones modernos se están convirtiendo en ordenadores con alas es en las cabinas de mando. Las pantallas y dispositivos de entrada de que ya disponen permitirían equipar una oficina de cambio de divisas y hay pilotos que se refieren a sus apretados puestos de trabajo como "el despacho".

En los nuevos puentes de mando, el tablero de instrumentos está simplificado, prescindiéndose de la vasta colección de indicadores y medidores analógicos tradicional. Los tubos de rayos catódicos (que pronto serán sustituidos por visualizadores planos de cristal líquido) presentan la información de forma más concisa y se supone que facilitan las "comprobaciones cruzadas" de los pilotos; es decir, los exámenes rápidos y atentos de la orientación, la velocidad aerodinámica, la actitud, la altitud y la velocidad ascensional, lecturas todas que aparecen ahora en una pantalla única, el visualizador de vuelo primario, como si de una retransmisión televisiva en directo del vuelo se tratase. El centro de la pantalla lo ocupa el director de vuelo, que guía al piloto a lo largo del trayecto deseado. A sus lados aparecen las medidas de la velocidad aerodinámica y la altitud sobre escalas tipo cinta. Debajo se ve el borde superior de una brújula circular. Se muestran también el gradiente de viento lateral y otras indicaciones.

Al observar una de estas pantallas, el piloto realiza una función comparable a la de un gestor de sistemas. Y así se lo dice Arnold W. Kraby, capitán de Delta Airlines, a los pilotos en trance de readaptarse tras haber ejercido su oficio durante muchos años con aviones "pilotados a mano", como el DC-9 y el Boeing 727. Hay un cursillo previo, de medio día, que sirve de preparación mental a quienes van a entrenarse con los nuevos aviones.

Kraby no se limita a reconciliar a los pilotos de Delta con los más avanzados artefactos que se encuentran en los últimos Boeing y McDonnell Douglas de la flota de su compañía. También pretende enseñarles a discernir en qué momentos resulta mejor pilotar un avión avanzado "como si fuera un 727", pasando por encima del sistema. "Se tiene una primera impresión de los problemas que esperan a cada uno preguntándole si tiene o no un ordenador en casa; si dice que sólo usa papel y lápiz, probablemente los tendrá." Problemas que quizá se reduzcan a las bromas provocadas por su velocidad de tecleo al introducir datos en el sistema de gestion de vuelo ("flight-management system", FMS), que hizo su aparición en los Boeing 757 y 767 a principios de los años ochenta.

Las varias docenas de microprocesadores del FMS pueden ingerir todo un plan de vuelo y encargarse luego de las tareas rutinarias que antes absorbían a la tripulación durante la mayor parte del viaje, proporcionando una cantidad de información enorme sobre la situación actual e incluso las futuras.

Un teclado situado al alcance de la mano del capitán y primer oficial es la vía de acceso al FMS, a través de la cual el piloto introduce la ruta, la predicción de vientos, la altitud y el peso sin combustible del avión. El propio sistema añade el del combustible, calcula el peso total, determina si podrá alcanzarse la altitud deseada y regula los mandos de gases para encontrar el régimen más eficaz. Incluso acepta un índice de coste, que es un número que calcula la aerolínea para equilibrar el gasto de combustible con el coste de pagar a la tripulación. Si, por ejemplo, el combustible es barato, el ordenador aumentará la velocidad aerodinámica, reduciendo así las horas de piloto y demás tripulantes.

Montones de cartas de navegación están incorporadas al FMS, aunque todavía se llevan a bordo las necesarias por si se avería el ordenador. La perspectiva de estos mapas digitales cambia con el movimiento del avión, gracias al acoplo con el sistema de navegación inercial. Con dos o tres ajustes, puede alterarse la escala del mapa desde unas 640 millas hasta 10 millas, o considerarse una aproximación de aterrizaje. "Se le dicen la latitud y la longitud y él sabe dónde están todas las demás cosas del mundo", afirma Kraby.

Hace poco, Kraby se dirigía de Seattle a Atlanta con un 757. Nada más despegar, recibió una llamada del centro de control de tráfico: "Delta tiene contacto con RMG." (RMG es la radiobaliza de guía de Rome, Georgia.) Kraby tecleó las letras y pulsó "execute" en el teclado del FMS. El sistema trazó la ruta más di-

recta (una "ortodrómica") hacia el radiotransmisor de Rome y calculó la distancia exacta y la hora de llegada, tras de lo cual procedió a pilotar el avión a través del país, suministrando los datos de navegación al piloto automático.

Pilotar los viejos Boeing 727 o DC-9 es una experiencia diferente, formada por una serie de saltos entre radiotransmisores, las radiobalizas omnidireccionales de hiperfrecuencia, o VOR ("Very high frecuency Omnidirectional Range beacons"). Cuando el aparato llega a uno de los VOR de su ruta, el piloto sintoniza la radio a la frecuencia del transmisor siguiente, con los datos que extrae de un mapa de papel y un plan de vuelo.

La tecnología del FMS ha desbordado la capacidad del sistema de control de tráfico aéreo. Un avión avanzado puede recorrer su ruta directamente, gestionar el descenso más económico sobre el destino (los motores consumen más combustible a baja altitud) y calcular, casi al segundo, la duración del viaje. Pero no suele poder utilizarse tal metodología, salvo en los espacios aéreos poco concurridos, porque el anticuado sistema de tráfico aéreo no puede acomodarse a trayectorias de vuelo flexibles.

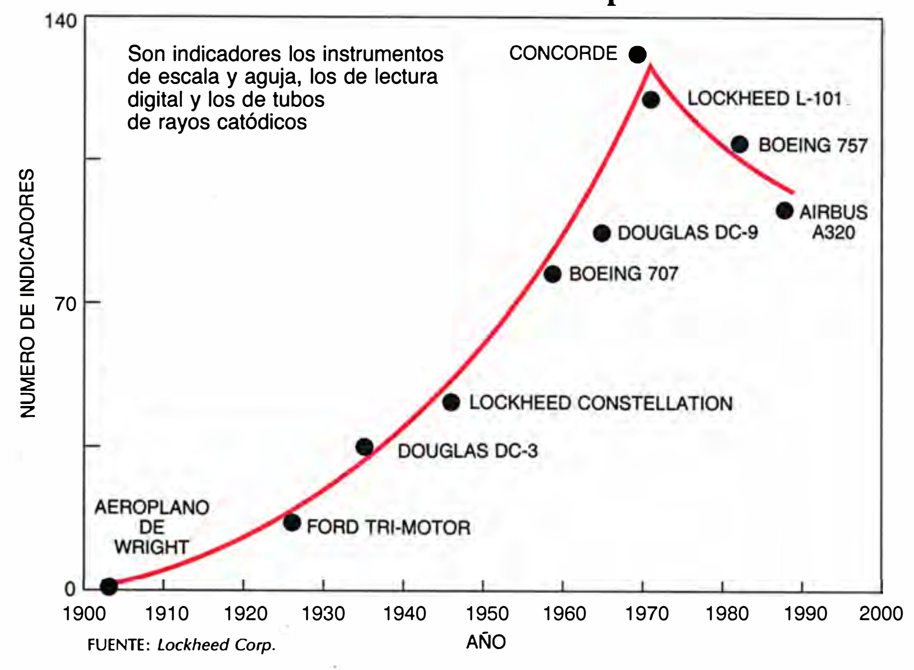
Baile de pistas

Tan distinta interacción entre avión y piloto ha obligado a estudiar sus efectos psicológicos. Un resultado obvio es que los pilotos deben practicar el vuelo manual para conservar la pericia. Pero se ha descubierto también que la automatización de las cabinas de mando podría sobrecargar a los pilotos durante despegues y aterrizajes, fases críticas del vuelo, sin que les dé suficiente quehacer durante las monótonas etapas intermedias. Algunos pilotos perciben una pérdida de control; les parece que en realidad no están llevando el avión.

No puede negarse que, al aterrizar, el FMS se convierte, más que en colchón de seguridad, en un verdadero tirano. Si bien no dirige el aterrizaje propiamente dicho, muestra en su pantalla si el piloto lo está haciendo bien y puede situar el avión automáticamente en la posición de espera si fuese necesario cancelar el aterrizaje. Todo esto en el supuesto de que el controlador no le pida al avión que cambie de pista, cosa corriente en las colmenas que son los alrededores de todos los aeropuertos metropolitanos de alguna importancia. Si tal pasa, el primer oficial tendrá que teclear frenéticamente los datos de la nueva pista para que el FMS pueda cumplir su función.

Tan apremiantes tecleos se harán innecesarios cuando haya un sistema avanzado de control de tráfico aéreo, momento en el que los datos de pista de aterrizaje se transmitirán directamente al avión por un enlace de comunicaciones que unirá al controlador con el vuelo que esté dirigiendo. El piloto se limitará a acusar recibo de los nuevos datos, puede que por la mera pulsación de un botón en el tablero de instrumentos.

Evolución del número de indicadores visuales en la cabina de pilotos



FUENTE: *Lockheed Corp.*

Los pilotos temen perder aún otra señal de las que los mantienen en contacto con su entorno. El efecto "teléfono compartido", por el cual oyen las conversaciones de otros aviones con los controladores, les alerta sobre las turbulencias, las posiciones de los demás y los atascos de tráfico. La forma de responder de un controlador puede revelar su grado de competencia y su carga de trabajo.

El aburrimiento y la autosatisfacción, las amenazas que se ciernen sobre la cabina de mando de un avión comercial, no son problema para los pilotos de caza. "La carlinga de un reactor de caza es la máquina más complicada que un ser humano tenga que manejar sobre la faz de la tierra", manifiesta Eugene C. Adam, director de McDonnell Douglas, que ha colaborado en el diseño de carlingas de aviones militares, desde el F-4 de los años sesenta hasta un prototipo del caza táctico avanzado ("Advanced Tactical Fighter", ATF).

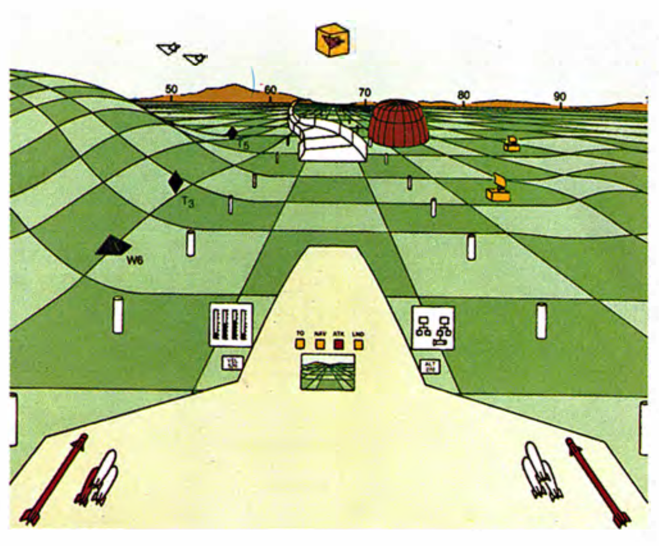
En el McDonnell Douglas F/A-18, la cantidad de información es tan densa como el fuego antiaéreo. Hay 675 siglas y 177 símbolos que pueden aparecer en cuatro tamaños diferentes en tres tubos de rayos catódicos distintos. Además, hay 73 indicadores de alarma, 10 posiciones del mando de gases, otros 10 mandos situados bajo un visualizador de "vista al frente" y 20 controles más dispuestos alrededor de los tres tubos de rayos catódicos.

La tarea intelectual más difícil es interpretar los ecos puntuales del radar de a bordo, los datos de los sensores pasivos que detectan las emisiones del radar enemigo y los enviados por los aviones del mando aerotransportado con información sobre asignación de blancos. Estas imágenes se reparten en varias visualizaciones, que el piloto debe examinar por separado mientras maneja un avión supersónico en la barahúnda del combate. En los nuevos diseños se procura combinar toda esta información en una única imagen coherente.

Dado que cada vez se domina más la creación de imágenes verídicas en una pantalla, el piloto ya no necesita mirar al exterior, en sentido literal. Ha sido precisamente el temor de los militares a que puedan emplearse láseres de baja potencia para cegar a los pilotos uno de los factores decisivos del desarrollo de visualizadores avanzados.

En el Laboratorio Armstrong, instalado en la Base Wright-Patterson de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos en Dayton (Ohio), puede vislumbrarse hasta dónde se podría llegar. Llevan más de veinte años desarrollando un





3. "EL BICHO" es el mote cariñoso que se aplica a uno de los visualizadores tridimensionales montados en casco (*izquierda*) desarrollados en la Base Wright-Patterson de la Fuerza Aérea estadounidense, en Dayton (Ohio). Una versión más avanzada de este casco podría algún día permitir a un piloto gobernar un caza de verdad mientras observa una escena parecida a un videojuego de tragaperras (*derecha*).

tipo de visualizador de datos de vuelo y de blancos en la visera de un casco, lo que permitiría que el piloto apuntase al enemigo sin más que girar la cabeza, aunque razones presupuestarias mantienen el proyecto a marcha lenta. En la pared de uno de los despachos cuelga lo que parece la imagen de la pantalla de una máquina tragaperras. Representa, dibujado con estilo tebeo, lo que se ve desde la carlinga de un reactor de caza que atraviesa una irreal escena de combate. Unos despachos más allá, un grupo de investigadores han estado dándole vueltas a la idea de un piloto real que atravesase realmente con su avión dicha escena.

Este laboratorio es una de las cunas de la llamada realidad virtual, simulaciones tridimensionales que echan mano de datos visuales, auditivos y táctiles. Un casco descomunal, que recuerda la cabeza de un insecto y que se emplea como instrumento de investigación por su gran campo visual, se remonta a 1978 y parece robado de una película de ciencia-ficción. Con éste y otros artilugios se experimentan las posibilidades y desarrollos de este enfoque. Si termina haciéndose realidad, hacia el año 2020, podrían obtenerse puentes de mando más baratos y más eficaces, útiles también para la aviación comercial, a donde podrían llegar incluso antes de que los militares los usen en el campo de batalla. El Centro de Investigación Langley de la NASA está trabajando con ahínco en técnicas gráficas y de vídeo que tal vez se incorporen a los transportes supersónicos del próximo decenio, cuyas cabinas de pilotos acaso se construyan sin visión delantera, y Alaska Airlines ha comenzado a utilizar las visualizaciones a la altura de la vista que adornan las carlingas de los cazas. Estos aparatos presentan una imagen holográfica de las lecturas de altitud, velocidad y demás parámetros en una pantalla transparente situada entre el piloto y el parabrisas de la cabina.

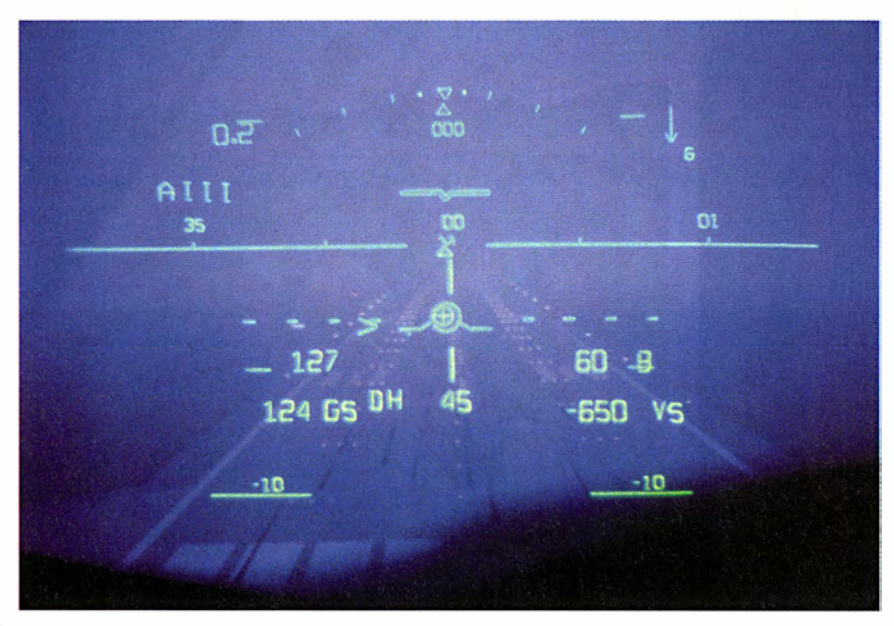
También se está estudiando la tecnología de visión sintética, que crea imágenes a partir de ondas de radar milimétricas y no con luz visible; podría ser útil para descongestionar las pistas, al permitir aterrizajes seguros en condiciones de lluvia o niebla.

¿Tocado del ala?

Aunque se tuviese éxito en el desarrollo de la visión sintética, su aprobación oficial podría resultar difícil. Lo irónico del caso es que pertenecerían a una misma institución, la FAA (la agencia de administración aeronáutica norteamericana), quienes hicieran ambas cosas, desarrollar las técnicas y obstaculizar su aplicación. Un sector de la agencia tiene a su cargo la verificación y certificación de que las nuevas tecnologías no entrañan peligro alguno para el vuelo. Cuenta con más de ochocientas personas dedicadas a esta tarea, a pesar de lo cual le ha resultado difícil mantenerse al ritmo de los rápidos cambios producidos. A comienzos de los años ochenta, sus anticuadas normas no cubrían el sistema de alarma en cabina de los Boeing 757 y 767, que combinaba señales acústicas y visuales. El fabricante consiguió convencer a los funcionarios de que era seguro, pero casi diez años después todavía no se ha actualizado el cuerpo normativo para que incluya sistemas de este tipo. Los ingenieros que los inventan y desarrollan se sienten decepcionados ante esta falta de capacidad y experiencia para valorarlos adecuadamente que presentan las autoridades competentes, lo que, a su vez, se atribuye a problemas políticos y presupuestarios.

Parece lógico que la evaluación de un sistema de aterrizaje automático de diseño radicalmente nuevo deba hacerse con toda garantía y sin precipitación, pero ha resultado arduo ponerse de acuerdo incluso sobre los criterios aplicables para evaluar la electrónica de un avión. Los elementos físicos implicados en aspectos críticos del vuelo han de cumplir con una condición aparentemente draconiana: su posibilidad de fallo no debe ser superior a una en mil millones de horas de vuelo. Ensayar por completo tal sistema es imposible; desde el comienzo de nuestra era han transcurrido menos de veinte millones de horas. Sólo puede llegarse a ese nivel de fiabilidad añadiendo sistemas redundantes; por ejemplo, reuniendo de tres a cinco ordenadores cuya fiabilidad nominal individual sea de varios miles de horas.

No hay exigencias comparables para la programación. Todavía no se ha logrado establecer un estándar para evaluar la fiabilidad de los programas, tarea que tropieza con múltiples factores de difícil o imposible cuantificación, que van desde la destreza de los programadores a las variaciones en la meteorología, las pistas y otros entornos de vuelo. Y si un sistema no puede construirse con el



4. LA PROYECCION a la altura de la vista de datos de navegación procedentes de los sensores y ordenadores de la aeronave ayuda a efectuar aterrizajes con poca visibilidad.

margen de seguridad requerido, hay o bien que descartarlo o bien que aceptar el gasto de suministrar un sistema mecánico subsidiario completo.

Experiencia e intuición se usan para desenmascarar los programas chapuceros. Se hacen comprobaciones selectivas de aquellas partes del programa que resultan decisivas para el vuelo. Si se descubre algo sospechoso, se investiga con más detalle aún.

Pero, pese a todo, los gazapos se cuelan. La primavera pasada, American Airlines demoró la recepción de su segundo MD-11 de McDonnell Douglas, en parte porque los visualizadores de cabina daban lecturas incorrectas. La FAA, en su evaluación de un dispositivo anticolisiones, está buscando defectos de programación que originen la aparición de imágenes "fantasmas" de otro avión en la pantalla, lo que obliga a los pilotos a hacer unas maniobras evasivas potencialmente peligrosas en los densamente concurridos espacios aéreos de la mayoría de los aeropuertos.

Los defectos de programación se agravan con el riesgo de errores adicionales por parte del piloto. Un chiste frecuente en las reuniones del sector habla de un hombre y un perro que van en la cabina de mando de un avión. El perro está allí para morder al hombre en cuanto intente tocar los mandos; la única misión del hombre es alimentar al perro. La chanza es tan conocida que puede saberse quiénes son los novatos por sus risas. Pese a ello, su idea básica está siendo considerada bajo la forma de aviones con un solo piloto. El primer oficial sería sustituido por el equivalente programado del perro: un sistema experto informatizado que respaldaría al piloto.

El copiloto

La presencia de dos pilotos en la cabina no pone totalmente a cubierto de errores. Los especialistas en factores humanos aeronáuticos tratan de desarrollar modelos de conducta capaces de explicar por qué ambos pueden a veces pasar por alto la información que les llega. Dos accidentes recientes de aerolíneas importantes, producidos en el momento del despegue, se debieron a negligencia en la colocación adecuada de los alerones.

Por ello se trabaja en conseguir listas de comprobación electrónicas y sistemas expertos que diagnostiquen las averías del motor, descifren si los datos introducidos por los pilotos son adecuados para una determinada fase del vuelo e incluso recomienden pautas de acción concretas. Sus diseñadores prefieren designarlos con eufemismos tales como "ayuda a la decisión" o "copiloto", para esquivar cualquier insinuación de atentado contra la supremacía del piloto.

El sistema experto aerotransportado más avanzado que existe es el programa "Pilot's Associate", patrocinado por la Agencia de proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa y la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. El prototipo no sólo vigila los sistemas mecánicos, sino que también recomienda cómo pilotar el avión. En una simulación aplicada al ATF, el sistema cerró automáticamente una válvula de combustible que se había atascado, trazó un rumbo para eludir un misil tierra-aire y sugirió una ruta de regreso para reunirse con los otros cazas. Aun así, la Fuerza Aérea no lo incorporó al ATF. Por una parte, no se dispone de los sistemas informáticos necesarios para procesar tan complejas situaciones mientras se están produciendo. Por otra, y quizá más importante, los pilotos sienten una profunda antipatía ante la posibilidad de tener un ordenador como copiloto: quieren poder tomar sus propias decisiones sobre lo que pueda matarles.

En la carrera entre los humanos y los canes, los primeros todavía parecen conservar ventaja. Sin embargo, determinadas personas reconocen en privado que hay argumentos a favor de que sea un ordenador quien maneje el avión. Con el correr de los próximos años, llegará un día en que los sistemas de control aéreo tendrán que empezar a autorizar aterrizajes a intervalos tan cortos que cualquier intervención del piloto a última hora equivaldría a un desastre seguro.

La renovación de los sistemas de control de tráfico aéreo demanda el desarrollo de sistemas expertos que ayuden a los controladores a programar el tráfico; los ordenadores de cabina tendrán que transmitir datos instantáneos sobre velocidad, posición y peso del avión, con tal rapidez que el piloto apenas será capaz de seguir lo que esté ocurriendo. La comunidad de información desdibujará la distinción entre cabina y centro de control.

Cabe preguntarse si el siguiente paso no sería el diseño del avión sin piloto. No es probable tal cosa. La gran ventaja del piloto humano será siempre su posibilidad de sacar adelante la nave en situación comprometida, aunque esté averiada, cuando el sistema experto informatizado ya no dé más de sí. Dependiendo de quién sea, el humano puede ser la salvación del sistema, su talón de Aquiles o ambas cosas a la vez.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIGITAL AVIONICS SYSTEMS. Cary R. Spitzer. Prentice Hall, 1987.

HUMAN FACTORS IN AVIATION. Dirigido por Earl L. Wiener y David C. Nagel. Academic Press, 1988.

SAFE SKIES FOR TOMORROW: AVIATION SAFETY IN A COMPETITIVE ENVIRONMENT. U.S. Congress Office of Technology Assessment, 1988.

THE NATIONAL PLAN FOR AVIATION HUMAN FACTORS. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, noviembre de 1990.

NAVIGATION: LAND, SEA, AIR AND SPACE. Dirigido por Myron Kayton. IEEE Press, 1990.

Juegos matemáticos

Los insectoides invaden un campo de robots

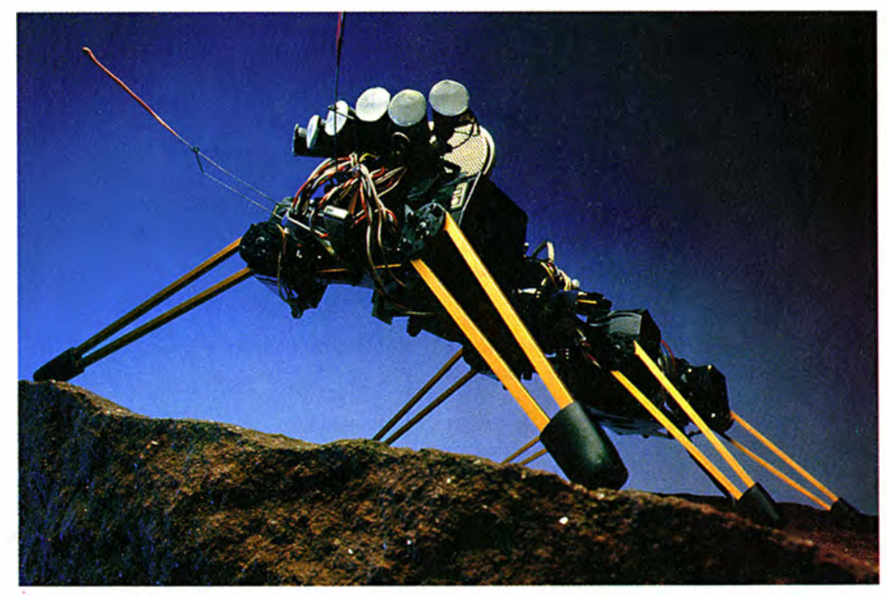
A. K. Dewdney

¿Consistirá el próximo hito de la robótica en una serie de máquinas económicas que repten, piensen y se conduzcan como insectos? Así lo esperan los investigadores del "laboratorio de insectos" del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Han engendrado allí un sinfín de minúsculos robots que se comportan como los artrópodos del condado. Estos "insectoides", nombre con que los he bautizado, se fundan en nuevos principios de diseño de robots y amenazan con provocar un cambio de paradigma en el campo de la robótica.

Hasta hace bien poco, al acometer el diseño de "cerebros" robóticos, los ingenieros adoptaban un enfoque analítico. En esta concepción, la tradicional, se decide primero qué es lo que habrán de captar los sensores del robot; se estudia después la forma en que éste habrá de analizar las señales sensoriales y, finalmente, cómo habrá el robot de planificar y ejecutar sus acciones. Cada estadio está atestado de complicaciones capaces de hacer embarrancar los proyectos.

Rodney Brooks, director del laboratorio de insectos, ha abandonado la vía tradicional y ha procedido a plantear sus proyectos desde una perspectiva inédita, a la que denomina arquitectura de subsunción. A la hora de llevar a la práctica sus presupuestos, Brooks comienza por diseñar una red de procesadores y otros equipos capaces de producir conductas sencillas. No se añaden al sistema conductas nuevas hasta que las conductas que subsumen no están perfectamente a punto y en marcha (o como quizá sea el caso, andando).

Por ejemplo, para diseñar una criatura artificial capaz de pasearse y evitar los obstáculos, Brooks empezaría por ensamblar un artefacto que se moviera al azar, añadiría después los detectores y procesadores encargados de la percepción de objetos y de la emisión de instrucciones para que la criatura cambiase de dirección. En la arquitectura de subsunción, las conductas complejas son resultado evolutivo de una variedad de funciones conductuales simples.



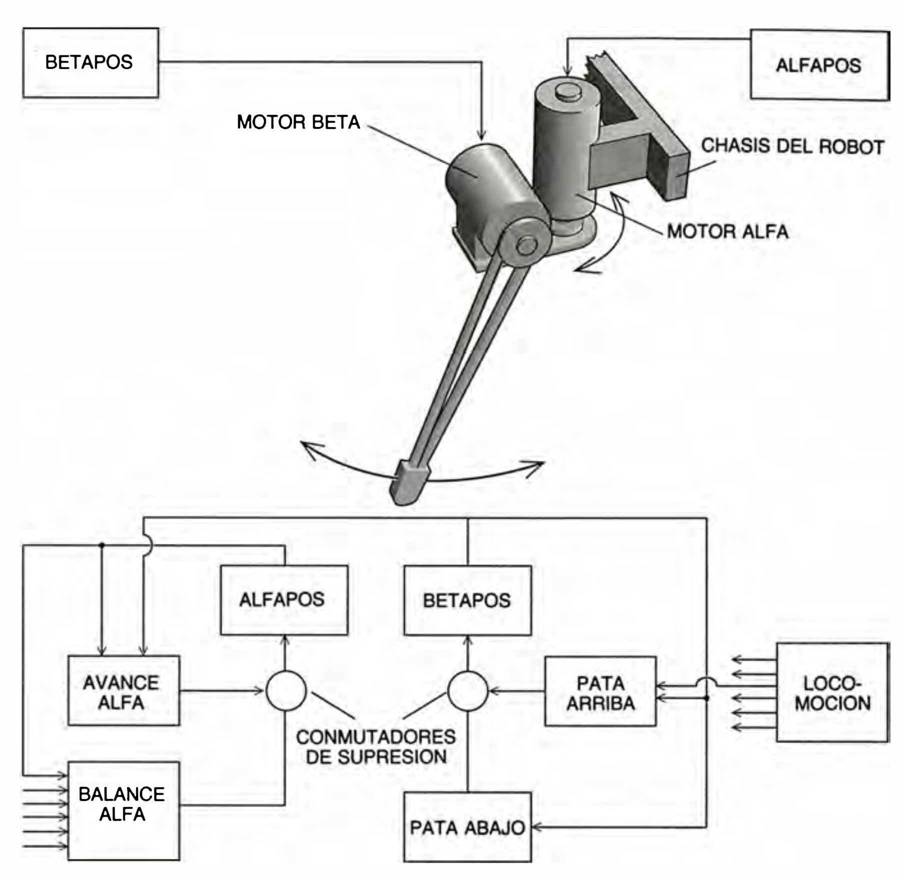
1. EL INSECTO ROBOTICO llamado Genghis constituye un banco de pruebas ambulante de la arquitectura de subsunción. Puede evitar obstáculos y acechar a personas.

Con el fin de verificar la viabilidad de la arquitectura de subsunción, Brooks y su joven equipo de recién graduados abordaron el proyecto y construcción de una pléyade de insectoides, desde Allen, un robot primitivo montado sobre ruedas, hasta Squirt, un delicado bichito no mayor que un saltamontes. Empero, ninguna de estas criaturas servirá mejor que Genghis para ilustrar la arquitectura de subsunción.

Genghis, un ensamblaje de motores, caballetes, engranajes y microcircuitos, de unos 30 centímetros de longitud total, es en buena parte creación de Colin Angle, uno del grupo. Está dotado de seis patas parecidas a zancos, dos barbas de gato y seis "ojos" infrarrojos transplantados de alarmas antirrobo. Cada extremidad está accionada por un par de motores *(véase la figura 2)*. Un motor alfa se encarga de mover la pata hacia adelante o hacia atrás; un motor beta hace oscilar la pata hacia arriba, alejándola del cuerpo, o hacia abajo, aproximándola. Entre las patas de Genghis se hallan microcircuitos que sirven a modo de centros nerviosos del insectoide. Los microcircuitos contienen numerosas "máquinas estado-finitas aumentadas", o por brevedad, MEFA. Cada MEFA almacena información numérica destinada a controlar diversos aspectos de la conducta de Genghis, como los movimientos de las patas. La información —el estado— de una MEFA puede cambiar de un instante a otro en función de las señales que, procedentes de otros módulos, ingresen en ella. El estado de la MEFA determinará también sus reacciones ante tales señales.

Antes de correr, el robot ha de poder andar. La verdad es que antes de hacer nada interesante, Genghis ha de empezar alzándose del suelo. Dos números enviados a las MEFA controlan los motores alfa y beta de cada pata. Una MEFA, llamada alfapós, controla el motor alfa y la otra MEFA, betapós, gobierna el motor beta. Cada número representa las posiciones vertical y lateral de las patas de Genghis cuando éste se encuentra "en pie". En cuanto Genghis es activado en esta situación, la más sencilla, todos los motores se ponen en marcha hasta que las posiciones de las patas (supervisadas por sensores) se hacen iguales a los números almacenados en alfapós y en betapós. Esta acción tan simple constituye lo que podríamos llamar nivel cero en la arquitectura de Genghis.

El siguiente de los niveles de conducta, la deambulación simple, constituye una proeza que los expertos en robótica siempre han juzgado técnicamente difícil. La red ambulacral básica de Genghis, en su forma más sencilla, consta de dos MEFA principales y otras 30 auxiliares, cinco por cada pata. Dado que los circuitos correspondientes a cada una de las seis patas del insectoide son esencialmente el mismo, describiré lo que le sucede a una pata y a las cinco MEFA que la controlan.



2. *CIRCUITERIA BASICA que permite a Genghis alzarse* (arriba) *y caminar* (abajo).

El elemento clave para la deambulación básica está constituido por un controlador global llamado balance alfa. Esta MEFA se encuentra recibiendo sin cesar informes en forma numérica, que dan cuenta de las posiciones de todas las patas. Los números positivos corresponden a patas que apuntan hacia adelante; un número negativo señala que su pata apunta hacia atrás. Mal podrá sorprendernos que las patas dispuestas perpendicularmente al cuerpo sean representadas por cero. El balance alfa efectúa la suma de los números anteriores, suma que constituye una especie de promedio. Si tal suma es positiva, ello significa que las patas se encuentran, en promedio, apuntando hacia adelante. Si la suma es negativa, la "extremidad media" se proyecta hacia atrás.

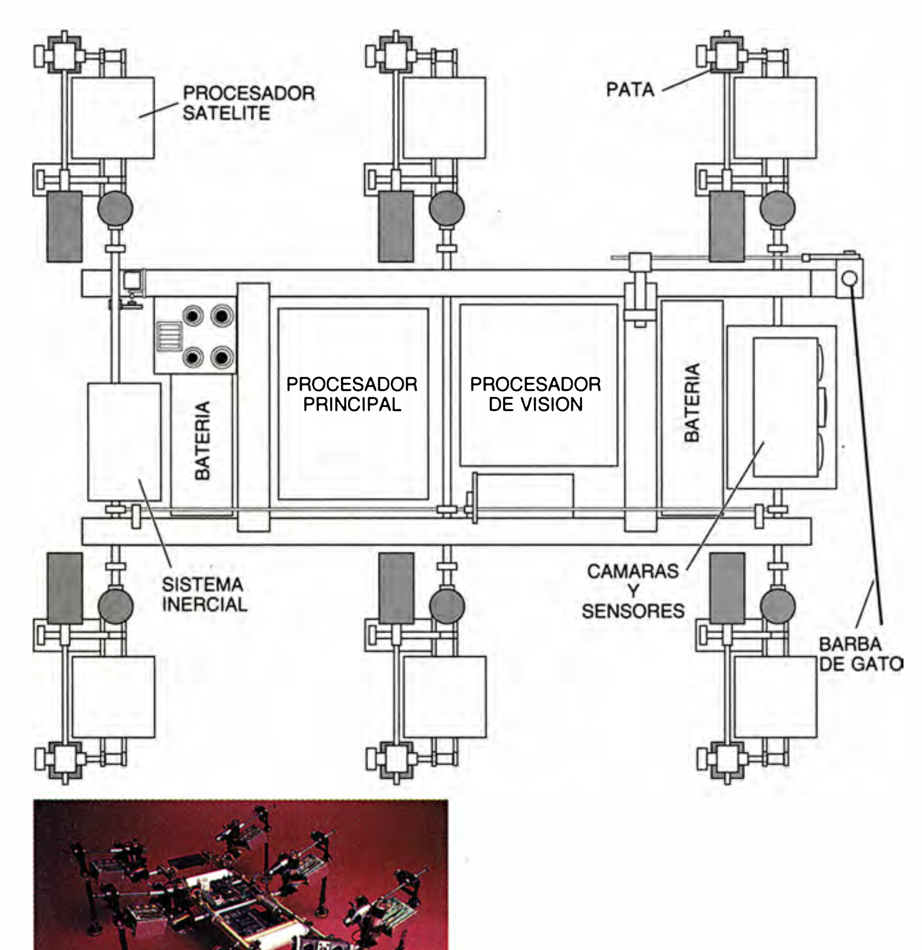
El truco entero de la deambulación gira en torno al hecho siguiente: si cinco de las patas se encuentran tocando el suelo y se provoca la elevación de la sexta, el insectoide podrá desplazarse un poquito hacia adelante, con sólo llevar un poco hacia atrás todas las patas apoyadas. Después, si el insectoide hace que la pata alzada trace un arco hacia adelante y regrese alegremente hacia el suelo, el paso que habrá dado será muy pequeño, pero la robótica habrá avanzado un salto colosal.

Cuando Genghis quiere que una de sus patas trace un arco hacia adelante, balance alfa genera una suma que es positiva; envía luego una señal negativa a todas las patas que en ese momento están abajo. Sus motores emiten un breve gemido; el insectoide avanza un poquitín y la señal vuelve a ser compensada. Y eso es lo único que interesa al módulo de balance alfa.

La forma de interaccción de los diversos módulos para crear la deambulación viene a constituir una especie de ballet electrónico entre los módulos correspondientes a las redes neurales de las patas. Para cada extremidad concreta, los acontecimientos comienzan con la activación del módulo de alzado. Dicha activación desencadena una serie de acontecimientos coordinados entre los módulos; seguidamente, el módulo de alzado dirige una señal al módulo betapós, enviándole un número que refleja una posición de extremidad alzada. El módulo betapós, que controla el motor beta, recibe normalmente un número positivo (que mantiene la pata firmemente plantada en el suelo) procedente de otro módulo llamado "pata abajo". La señal negativa, nueva, venida del módulo de alzado, suprime la señal negativa llegada del módulo de pata abajo. En virtud de ello, el motor beta eleva la pata hasta que la posición comunicada sea igual a la nueva señal.

Este acontecimiento dispara un estado de finalización en el módulo betapós, que comunica dicho estado a otros tres módulos: avance alfa, módulo de alzado y módulo de pata abajo. El módulo de avance alfa, que controla el movimiento hacia adelante y atrás de la pata, envía una señal fuertemente positiva al módulo alfapós. El motor alfa zumba suavemente y la pata traza un arco hacia adelante, como si estuviera tanteando el aire. Cuando el módulo de alzado recibe la señal de conclusión, se suprime su acción; cuando la recibe el módulo de pata abajo, queda activado y el motor beta impulsa hacia abajo la extremidad, hasta apoyarla en tierra firme.

Un módulo principal, llamado "locomoción", controla el movimiento entero enviando una secuencia de se-



3. ANATOMIA de un insectoide llamado Atila, que vemos arriba y a la izquierda.

ñales a los seis módulos de alzado. Pero, ¿qué secuencia deberá utilizar? La pauta de excitación más corriente en los insectos es conocida por ambulación trípode-alternante. Rotulemos con *D* las patas del lado derecho y con *I* las del izquierdo; numerémoslas 1, 2, 3 de delante atrás; los trípodes alternantes son *D*1, *I*2, *D*3 e *I*1, *D*2, *I*3. En situaciones normales, insectos como la cucaracha elevarán el primer conjunto *D*1, *I*2, *D*3, mientras el otro conjunto permanece en el suelo. Esta disposición triangular le proporciona estabilidad a la cucaracha, mientras el primer conjunto de tres patas traza un arco hacia adelante, buscando nuevas posiciones. Después se pueden elevar las patas del otro grupo y llevarlas hacia adelante del mismo modo, mientras el primer conjunto proporciona estabilidad.

El módulo de locomoción puede enviar una versión secuencial de este sistema de señales a los seis módulos de alzado. También podría enviar la pauta que a veces utilizan los insectos trepadores: *D*3, *I*1, *D*2, *I*3, *D*1, *I*2. Existen numerosas posibilidades de deambulación estable.

Tal vez gusten los lectores diseñar la marcha de una máquina ciempiés. Suponiendo que un insectoide tuviera 100 patas por cada costado, hay que idear un sistema ambulacral que haga avanzar a tal criatura sin que el cuerpo deba arrastrar ninguna pata.

Con la rudimentaria red recién descrita, Genghis consigue caminar, pero no muy airosamente ni tampoco de forma "robusta", por usar la terminología de Brooks. Para empezar, Genghis se bambolea excesivamente y no es capaz de salvar obstáculos de altura moderada. La adición de unas cuantas MEFA más, de diversas clases, proporciona un nuevo nivel de arquitectura de subsunción y un nuevo grado de competencia conductual.

Un módulo de fuerza-beta supervisa los elevados esfuerzos que sufre el motor beta cuando el punto en que se posa la pata le obliga a soportar una fracción excesiva del peso total de la criatura. Tal vez Genghis haya pisado un guijarro de cinco centímetros, pongamos por caso. El módulo de balance beta correspondiente a esa extremidad detecta lo insólitamente elevado de la fuerza y envía un mensaje cero que anula la orden de descenso de la pata, proporcionando a ésta "adaptabilidad". Dicho de otro modo, la pata cede un poquito y Genghis compensa así la prominencia del terreno que hay bajo una de sus patas.

Pero en suelos inclinados, el extremo de Genghis que se encuentre apuntando cuesta abajo habrá de soportar más peso que el extremo alto, y las patas, al "adaptarse" y ceder, propenden a aumentar más todavía el cabeceo. La corrección de este problema exige dos módulos de "cabeceo" que supervisen las salidas de un clinómetro. Los módulos de cabeceo envían mensajes para inhibir aquellos módulos de balance beta que se hayan tornado demasiado flexibles.

Si Genghis encuentra un obstáculo al llevar hacia delante una de sus patas, un sensor instalado en el motor detecta ese esfuerzo extraordinario y envía un mensaje al módulo fuerza alfa. Esta MEFA envía entonces una señal al módulo de elevación de la pata, obligando a una mayor elevación de la misma.

Entre los muchos sensores que Genghis utiliza se cuentan dos barbas de gato y seis sensores infrarrojos. Las barbas de gato envían sus informes a un módulo de palpación. Cuando una de las barbas de gato detecta un obstáculo, el módulo de palpación repone a cero el módulo de alzado de una de las dos patas delanteras.

Los sensores de infrarrojos introducen el siguiente de los principales niveles de subsunción. Los sensores operan en conjunción con un módulo de "merodeo", lo que confiere a Genghis una modalidad de conducta un tanto siniestra. En esta modalidad, Genghis descansa tranquilamente hasta que detecta radiación infrarroja, procedente, por ejemplo, de un tobillo humano próximo. Cuando tal ocurre, Genghis activa su módulo de locomoción. La criatura empieza entonces a reptar hacia adelante, como un insecto demente, encaminándose hacia el desprevenido e infeliz humano. Desde luego, uno tiene tiempo sobrado para apartarse. Si además se dota a Genghis de un módulo de guiado, puede ser implacable.

Hace cosa de un año, más o menos, cuando un visitante curioso vio al in-

sectoide por primera vez, preguntó si "aquello era un bicho".

"No", replicó Brooks, repitiendo una broma clásica entre programadores, "es una función". Brooks estuvo algún tiempo empeñado en llamar "Función" al insectoide. Pero más tarde, alguien del grupo propuso bautizarlo "Genghis", que parecía nombre más al caso para una criatura cuyos instintos eran merodear al acecho y conquistar.

Recientemente le han sido añadidos a Genghis nuevos circuitos, con el propósito de ver si en ausencia de un módulo central, como locomoción, podría llegar a surgir una conducta autoorganizada. Los resultados fueron impresionantes. Se concedió al microcircuito que hacía las veces de ganglio motor de cada pata la opción de experimentar por su cuenta con una serie de conductas básicas: elevar una pata, bajarla, que trazara un arco hacia adelante o hacia atrás. Cada experimento consistió en registrar lo que hacían las patas vecinas, ensayar seguidamente una de las conductas básicas y verificar si el cuerpo se caía o no. Era cosa fascinante de ver, según Brooks. El insectoide podía permanecer posado un rato en el suelo, agitando las patas en el aire; tambalearse después un poquito, y empezar por fin a moverse hacia adelante con pasitos inseguros. ¡En el plazo de un minuto y medio, la red neural "aprendía" siempre la deambulación en trípode alternante!

La noción de autonomía preside y gobierna todo el método de subsunción con que el laboratorio de insectos del MIT está abordando el problema de la arquitectónica de robots. ¿Podremos dotar a un robot, por pequeño que sea, de un comportamiento tal que le haga capaz de sobrevivir durante periodos largos en el mundo real? El insectoide llamado Squirt cabrá en una cajita cúbica de unos 2,5 centímetros de lado. Es demasiado pequeño para que la actual tecnología de robots pueda dotarle de patas, así que va provisto de ruedas, de un único motor, de un microprocesador, de dos pilas de litio y de tres sensores. Se vale de dos micrófonos para captar sonidos y de un sensor óptico para detectar el nivel luminoso existente.

Squirt sobrevivirá... siempre y cuando no sea pisoteado. Por esta razón ha sido programado con varios estratos de conducta, transferidos electrónicamente desde un ordenador a su único microcircuito. Squirt se oculta en las sombras, pendiente de los ruidos. De no oír nada durante varios minutos se aventura a salir, tomando la dirección general del sonido más recientemente percibido. Tras vagabundear un ratito emprende una exploración en espiral, en busca de un nuevo escondrijo.

En este aspecto Squirt se asemeja a los vehículos imaginados por el científico alemán Valentin Braitenberg, de los que nos hemos ocupado tiempo atrás. La finalidad de los vehículos de Braitenberg consistía, entre otras cosas, en ilustrar la tesis de que sistemas de control muy sencillos podrían dar por resultado comportamientos muy complejos. Tesis que ha inducido a más de un entusiasta de la robótica a construir vehículos conductuales. Pero han sido Brooks y compañía, también en parte instigados por los vehículos de Braitenberg, los primeros en tener éxito. No faltarán los dispuestos a adscribir emociones como las de temor o nostalgia a los vehículos de control neural. ¿Podrá decirse que Squirt teme a la gente? Desde luego, así es como actúa.

Anita Flynn, del equipo que construyó Squirt, ve florecer la robótica en insectoides más pequeños aún, a los que llama mosquitos. Tales criaturas serían del tamaño de insectos reales, por no decir de los mosquitos en sentido estricto. Los órganos de su cuerpo se fabricarían con las técnicas que se emplean para la grabación de microcircuitos sobre superficies de silicio. El mayor inconveniente reside en los motores ultradiminutos que estos mosquitos van a requerir. La especialidad de microingeniería ha producido ya engranajes que volarían en pedazos por un estornudo.

¿Llegarán algún día a mandar los insectoides? Brooks, cauteloso, no desea profetizar sobre el futuro de la arquitectura de subsunción, pero sí tiene la intención de llevar la idea hasta sus últimas consecuencias. ¿Encontraremos que al añadir estratos de comportamiento más y más complejos seguirá funcionando la técnica de subsunción, o nos tropezaremos con una barrera que obligará a recurrir a técnicas más o menos similares a las tradicionales? Estoy seguro de que estas cuestiones habrán de picarle durante el futuro previsible.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GEARING DOWN. Ivan Amato en *Science News,* vol. 139, N.º 2, págs. 26-27; 12 de enero de 1991.

BEAM ROBOTICS. Michael C. Smit y Mark W. Tilden en *Algorithm,* vol. 2, N.º 2, págs. 15-19; marzo de 1991

Libros

De agricultura clásica, edafología mecánica de fluidos y naturalistas

Pere J. Quetglas, Juan Gallardo, August Palanques y Luis Alonso

Paladio, Tratado de agricultura. Medicina veterinaria. Poema de los injertos. Traducción, introducción y notas de Ana Moure Casas. Madrid; Gredos, 1990.

Paladio Rutilio Tauro Emiliano fue un *uir illustris* que debió de vivir a caballo de los siglos IV y V de nuestra era. Propietario de tierras en Cerdeña y en los alrededores de Roma, concibió y desarrolló la idea de dar forma a un tratado de agricultura dirigido a los pequeños y nuevos propietarios agrícolas. Y, en realidad, poca cosa más sabemos de él. Todo lo que se pueda añadir afecta sobre todo a la fortuna de su producción en los siglos sucesivos. Lo esencial de esta producción es el tratado de agricultura en trece libros, que suele presentarse, como aquí, acompañado de otras dos obras menores de temática afín: un tratadito de medicina veterinaria y un poema sobre los injertos, que sigue una antigua tradición de tratar en verso temas científicos y didácticos.

La voluntad de Paladio al redactar el tratado de agricultura era la de compilar lo esencial de los tratados agrícolas anteriores —Catón, Varrón, Gargilio Marcial, *Geopónicas* y, sobre todo, Columela—, pero con un lenguaje y un estilo mucho más asequible a un público presumible de agricultores poco versados en cuestiones de letras; por lo menos así lo expresa el propio Paladio al iniciar el primer libro: "La primera precaución es tener en cuenta a la persona que vas a enseñar, y el que instruye a un agricultor no debe emular a los oradores con filigranas retóricas, como hicieron muchos, que por hablar con erudición a los agricultores consiguieron que su enseñanza no pudiera comprenderse ni siquiera por los más eruditos", con una, no por velada poco clara, alusión a Columela. Seguramente esta voluntd de simplicidad y de hacer su obra más asequible no es ajena al éxito que Paladio tuvo en la Edad Media, pues es, con diferencia, el autor más leído y divulgado en esta época.

El declinar de su influencia, particularmente en España, hay que asociarlo con el redescubrimiento renacentista de Columela —mucho más atractivo para los humanistas en función de su estilo— y con las consiguientes reacciones nacionalistas que su origen gaditano iba a suscitar en España. Con todo, el éxito de que gozó la obra de Paladio no puede dejar de relacionarse también con una serie de circunstancias que la hicieron en su momento novedosa y atractiva. En primer lugar, la división del tratado en trece libros, uno de introducción y uno por cada mes del año, le confería un carácter de almanaque práctico de fácil consulta. Este aspecto utilitario se veía reforzado asimismo por la disposición en capítulos de los que se daba un índice al comienzo de cada libro, lo que confería al conjunto un aspecto muy similar al que tienen los tratados científicos actuales. Estos aspectos, sin ser enteramente originales —en el libro XI de Columela podemos encontrar un calendario agronómico y, en algunos manuscritos, un índice de contenido de toda la obra—, sintetizan, sin embargo, el mérito de un autor que supo captar en su momento la importancia de una idea y se atrevió a desarrollarla extensamente.

En lo que se refiere al contenido, en cada libro se le suministran al lector indicaciones acerca de las labores propias del campo que se deben acometer en cada momento: poda, injerto o acodo de viñas, labranza, sacha, siembra, recolección, mantenimiento, etc. Siendo muy característico, y por lo demás muy propio de la ciencia antigua, el combinar recomendaciones prácticas, cuya bondad era el resultado contrastado de una larga experimentación, con prácticas meramente mágicas o astrológicas, como cuando el libro III, cap. 25, recomienda frotar la copa del manzano con hiel de lagarto para evitar la podredumbre del fruto. Mas, por encima de la anécdota, haríamos muy mal si nos quedáramos en estas curiosidades y no tuviéramos en cuenta el acervo cultural que se esconde detrás de algunas recomendaciones.

Por otro lado, junto a estas indicaciones propiamente agrícolas, no faltan los consejos acerca de la conservación de los frutos, ni sobre la forma de elaborar productos secundarios como aceite, vino, dulce de membrillo, pasas, higos secos, etc. Sin que se descarten, tampoco, los consejos apícolas y ganaderos, ni algunas útiles referencias a cómo se deben construir las dependencias agrícolas. Y, como cosa curiosa, al final de cada libro se ofrece un cuadro horario en el que las horas vienen determinadas por la longitud de la sombra que proyecta un patrón de características desconocidas para nosotros, pero que en la antigüedad debía ser lo suficientemente conocido como para evitar que el autor hiciera referencias expresas a él. Finalmente, en lo que afecta al tratado de medicina veterinaria y al poema de los injertos, de escasa entidad los dos, quizá lo más destacable sea el contraste entre la aridez del primero y la artificiosidad retórica del segundo, como una curiosa muestra de adaptación del estilo al género.

La profesora A. Moure, antigua estudiosa y editora de Paladio, nos ofrece una meritoria aproximación a la figura y a la obra de este autor. En primer lugar con una traducción concienzuda, en que su conocimiento del lenguaje técnico agrícola le permite hilar muy fino en la identificación y en la búsqueda de las equivalencias modernas o actuales en un mundo tan complicado como el del léxico agrícola. Esta preocupación por el referente se manifiesta también a través de la inclusión de interesantes notas aclaratorias siempre que la situación lo exige. La traducción tiene además la particularidad de ser la primera castellana, si se prescinde de una anónima del siglo XVI, que, en realidad, no es sino una paráfrasis de otra catalana, obra de Ferrer Sayol (s. XIV). Esta particularidad justificaría ya por sí misma la obra; sin embargo, a la traducción añade la profesora Moure una introducción en que se pasa revista en profundidad a las diversas cuestiones relacionadas con la personalidad y la obra de Paladio: identificación, fuentes, historia del texto y de la investigación, y pervivencia de la obra paladiana, en particular en España. El conjunto se completa con

ELEMENTOS

NATURALES Y CHYMICOS

DE

AGRICULTURA,

DEL CONDE

Gustavo Adolfo Gyllemborg.

TRADUCIDOS DEL INGLES

Por el Dr. Don Casimiro Gomez de Ortega,

Primer Profesor del Real Jardin Botánico, de la Real Academia de la Historia de España, y de las Reales Sociedades Económicas de Madrid, Bascongada, de Sevilla, &c.

SEGUNDA EDICION,

En que va añadida la Reduccion de las voces Chymicas á las de la nueva Nomenclatura.



MADRID M.DCC.LXXXXIV.

EN LA IMPRENTA DE LA VIUDA DE IBARRA.

CON LICENCIA.

1. Hasta el siglo XVIII *llega la influencia de Paladio, cuando comienza la aplicación de la química a la agricultura y se inicia el estudio sistemático de los suelos.*

las correspondientes indicaciones bibliográficas más un índice de materias y un utilísimo cuadro de equivalencias métricas.

En suma, nos encontramos ante un libro que interesará no sólo a los humanistas y clasicistas, sino también a los amantes de la historia de la ciencia, en particular de la agrícola, que encontrarán en él una amplia muestra de los usos agropecuarios de la antigüedad, que en algunos casos puede que estén todavía faltos de la oportuna comprobación científica. (P.J.Q.)

SOIL ORGANIC MATTER, por Robert L. Tate III. John Wiley and Sons; Chichester, 1987. **HUMIC SUBSTANCES AND THEIR ROLE IN THE ENVIRONMENT**, dirigido por Frimmed y Curistmow. John Wiley & Sons; Chichester, 1988.

Después de los tratados clásicos sobre materia orgánica edáfica de Allison, Kononova, Schnitzer y Stenvenson de los años setenta o principios de los ochenta, todo (o casi todo) parecía estar dicho sobre la materia orgánica del suelo y substancias húmicas. Pero la nueva ola de preocupación y respeto al ambiente (metales pesados, lodos urbanos, etc.), así como la situación "ecotónica" en la que se sitúan las substancias húmicas edáficas (entre la litosfera y la biosfera), ha instado la aparición de nuevos tratados.

Soil Organic Matter consta de catorce capítulos. En el primero se expone el origen y distribución de la materia orgánica edáfica, resaltando el papel de ésta; en el segundo, la función de aquélla en ecosistemas naturales y agrícolas. Se nos introduce luego en el mundo de los microorganismos edáficos, actividades enzimáticas, biomasa microbiana, humificación, fracciones húmicas, degradación de la lignina, etcétera, que ocupan otros seis capítulos. El noveno se consagra a la materia orgánica como fuente de nutrientes, que se completa en el décimo. Señala después el papel que la materia orgánica edáfica desempeña en la estructura del suelo, que, a su vez, repercute en el balance hídrico. En el duodécimo se exponen algunos modelos conceptuales y matemáticos (en especial, la formulación de Michaelis-Menten), sin obviar sus limitaciones.

Toda la doctrina anterior se torna aplicación práctica en el siguiente capítulo, con el propósito de mantener (cuando no de incrementar) los niveles de materia orgánica de los suelos cultivados, bien directamente (adición de abonos orgánicos), bien indirectamente (control de la erosión, tipo de labranza); se tienen en cuenta los problemas colaterales causados por el uso de lodos u otros subproductos orgánicos industriales.

El último capítulo vuelve a resaltar la importancia de la materia orgánica edáfica en el medio natural y agrícola: sus efectos positivos sobre la estructura edáfica, la acumulación de efectos tóxicos accidentales, la protección de los ecosistemas a conservar, el mejoramiento de terrenos marginales y semidesérticos, etc. Relaciona el desarrollo viable y el cambio global con la situación de la materia orgánica edáfica.

Aunque la obra denota un mayor desarrollo en la temática de la que el autor es especialista (y verdadera-

mente profundiza), no deja de ser un libro accesible para biólogos, químicos o bioquímicos que desean adquirir un conocimiento sólido de la materia orgánica. El autor relativiza, además, muchos de los trabajos de investigación sobre la materia orgánica del suelo, dudando de su valor fuera de las condiciones del experimento concreto; reconoce el difícil paso, fundamental, desde los estudios controlados (sean *in vitro*, incluso *in situ*) a los hechos que se dan verdaderamente en la naturaleza.

Humic substances and their role in the environment recoge las aportaciones de un seminario reciente celebrado en Berlín sobre materia orgánica y su papel en los procesos ambientales. Se divide en tantas partes cuantos grupos de trabajos. El primer grupo se ocupó de la extracción y aislamiento de las sustancias húmicas, cuestión traída y llevada como ninguna. Parsons abrió el debate haciendo una revisión del tema. En la discusión se intenta fijar los términos de ácidos "húmicos", "fúlvicos" y "huminas"; se destaca la importancia de un banco de dichas sustancias, se indica la necesidad de citar su origen y se insiste en la aplicación de las nuevas técnicas al estudio de los ácidos húmicos. El segundo grupo se propuso articular el estado de la investigación sobre las génesis de las substancias húmicas, así como la influencia del medio en dicho género. Hedges trae a colación la larga lista de cuestiones pendientes: precursores, actividades enzimáticas, procesos de condensaciones, edad de las fracciones, papel del N y el azufre, etc. El tercer grupo buscó la solución de los problemas de estructura, encargándose Ziechmxan de acotar los límites; se repasaron los diferentes aspectos de los modelos estructurales y las nuevas tecnologías.

El último grupo se centró en la influencia de los factores ambientales sobre la formación de sustancias húmicas. Weber analiza el lugar de las mismas en el transporte de elementos metálicos en la naturaleza. Huc recopila la sedimentología de la materia orgánica, y otros se detienen en algunos procesos en los que la materia orgánica interviene de manera decisiva: interacción de la materia orgánica con metales y substancias xenobióticas. Se critica que los llamados "químicos del humus" tiendan a tratar y analizar las muestras lejos de la naturaleza, con lo que la validez de sus postulados de los procesos queda en entredicho. Dos libros, en definitiva, de distinta factura pero de idéntico interés. (J.G.)

A MATHEMATICAL INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS, por A. J. Chorin y J. E. Marsden. Springer Verlag; Nueva York, 1990.

Este texto es la segunda edición de una obra bien conocida. La primera edición, aparecida en el año 1979, recogía en forma de libro las notas mecanografiadas de un curso de mecánica de fluidos impartido por los autores en la Universidad de California. Esta segunda edición se diferencia de la primera en añadidos y correcciones, en la inclusión de ejercicios al final de cada apartado y en una mejor presentación tipográfica (puesto que el mecanografiado original se ha substituido por un tratamiento de textos informático). La obra revisada aparece en una nueva colección de la editorial Springer, *Texts in applied Mathematics* (*TAM*), destinada a ofrecer monografías útiles en cursos de licenciatura o diplomatura.



2. Leonhard Euler (1707-1783). Llevan su nombre las ecuaciones que gobiernan los fluidos ideales.

El prefacio de la colección, que antecede al prefacio de la obra, nos dice que la serie *TAM* intentará responder al interés por la matemática aplicada, en sus aspectos clásicos y modernos (computación numérica y simbólica, sistemas dinámicos y caos). La inclusión del libro de Chorin y Marsden como cuarto título de la nueva colección demuestra el valor y la frescura de este texto, once años después de su primera edición (que ya mereció una reimpresión en el año 1984.)

Los autores, matemáticos bien conocidos, no requieren presentación. Baste señalar la dedicación de Chorin a la mecánica de fluidos y a la turbulencia (particularmente, en sus aspectos numéricos), y la dilatada labor de Marsden en sistemas dinámicos, mecánica y análisis global.

En la introducción exponen su propósito. No tratan de proporcionar una recopilación exhaustiva de la mecánica de fluidos ni de comentar el valor ingenieril de diversas técnicas de esta disciplina. Presentan algunas de las ideas básicas de "forma matemáticamente atractiva", y recogen los fundamentos físicos de técnicas analíticas y numéricas usadas en el estudio de las ecuaciones de Navier-Stokes y los sistemas hiperbólicos. Su objetivo final, naturalmente, es lograr que el lector se interese por tan hermosos y difíciles temas. En mi opinión, los autores lo consiguen, precisamente por ofrecer un texto que, tras un primer capítulo general, que introduce las ecuaciones y nociones básicas de mecánica de fluidos, se centra en dos problemas particulares.

Este libro está situado en la frontera que separa, o más bien une, física y matemática; una frontera que cada día es más extensa y compleja (diríase que tiene carácter fractal). Es por ello un texto ideal, principalmente su primer capítulo, para la enseñanza introductoria de la mecánica de fluidos en una licenciatura de matemáticas. De hecho, ha servido (y continúa sirviendo) para tal fin en la facultad de matemáticas de la Universidad de Barcelona. No obstante, sus posibilidades son mucho más amplias, y no se limitan a un virtual uso como libro de texto para un curso de mecánica de fluidos. La obra puede interesar tanto a un físico que quiera conocer algunos aspectos matemáticos de la mecánica de fluidos, como a un matemático que quiera ver el origen físico de ecuaciones y fenómenos que ya conoce. También un ingeniero puede hallar en este libro fuentes de inspiración, o el tratamiento matemático de técnicas que está usando (concretamente, en los capítulos segundo y tercero). Los únicos requisitos para cualquier lector son un dominio suficiente del análisis vectorial y el conocimiento de las nociones básicas de la mecánica de Newton.

El primer capítulo presenta y desarrolla las ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos a partir de las leyes de conservación de la masa, el momento y la energía. El primer apartado está dedicado a las ecuaciones de Euler, las ecuaciones que gobiernan los fluidos ideales, en los que no hay fuerzas de viscosidad. Tras establecer las dos herramientas básicas en la descripción de un fluido, a sa-

ber, el campo de velocidades y la densidad de masa, los autores obtienen la primera ecuación, la ecuación de continuidad, que refleja en forma diferencial la conservación de la masa. Seguidamente, introducen la derivada material, o derivada a lo largo de una trayectoria; con ella, y suponiendo que las fuerzas internas del fluido se reducen a una presión, establecen la segunda ecuación de un fluido ideal; comúnmente conocida como ecuación de Euler, refleja el balance diferencial del momento lineal. Con el teorema del transporte, logran una demostración más rigurosa de la ecuación anterior y estudian la incompresibilidad y sus consecuencias. Finalmente, la conservación de la energía se traduce en la noción de fluido isentrópico (donde se han corregido los errores de la primera edición) y en el teorema de Bernoulli. El apartado concluye con un ejemplo muy ilustrativo, puesto que pone de manifiesto las limitaciones que presupone no considerar fuerzas de fricción o viscosidad.

Se ocupan luego de la noción de vorticidad. Tras relacionarla con la rotación del campo de velocidades, establecen el "teorema de circulación de Kelvin" y demuestran que la vorticidad se propaga con el flujo. Después, introducen la noción de tubo de vorticidad y el "teorema de Helmholtz". Estos resultados reflejan la "conservación" de la vorticidad en un fluido ideal. La concreción de lo anterior a un flujo bidimensional incompresible sirve de colofón a este apartado.

El tercer apartado presenta la ecuación de Navier-Stokes, centrada principalmente en el caso incompresible. Tras deducirla, introducen el número de Reynolds, y muestran su importancia física (al establecer la noción de flujos similares) y matemática (al separar los flujos fuertemente disipativos de los fuertemente convectivos). A continuación, estudian la disipación de energía en un fluido viscoso, y resuelven en un ejemplo la paradoja presentada en el ejemplo del primer apartado.

En el segundo capítulo, tratan de la relación entre fluidos viscosos y fluidos ideales. Por ello, dedican el primer apartado a los flujos potenciales, es decir, los flujos no viscosos de vorticidad nula. Tras caracterizarlos matemáticamente, establecen los teoremas de Blasius y Kutta-Joukowski. Con ellos estudian varios ejemplos, en particular, la paradoja de d'Alembert en tres dimensiones. Como ejemplo final, introducen un modelo "cuasi-potencial" de vórtices en movimiento. Todo el contenido del apartado está íntimamente ligado a la ecuación de Laplace y las funciones armónicas (en dimensiones dos y tres). Por ello, resultará particularmente atractivo para los lectores interesados también en estos temas.

El segundo apartado, sobre la noción de capa límite, empieza con unos ejemplos sencillos para mostrar cómo la aparición de una capa límite distingue la evolución de un fluido viscoso de la de un fluido ideal. La capa límite genera vorticidad y queda gobernada por la ecuación de Prandtl. Combinando capas límite en las zonas cercanas a las fronteras del fluido con un flujo ideal en el resto, pueden obtenerse soluciones aproximadas de la ecuación de Navier-Stokes.

En el tercer y último apartado del segundo capítulo, presentan el modelo de hojas de vorticidad. Tras recordar algunas nociones de teoría de probabilidad y, en particular, la idea de camino aleatorio, las utilizan para definir las hojas de vorticidad. Con ellas establecen un método para reconstruir soluciones de la ecuación de Prandtl: las hojas de vorticidad se mueven en un flujo ideal con una componente aleatoria que simula la difusión viscosa.

El capítulo termina con una sucinta presentación de las nociones de estabilidad y bifurcación, en un addéndum que no aparecía en la primera edición. La brevedad de este añadido resalta el principal defecto de la obra: no aborda la turbulencia, ni tan sólo introductoriamente.

Los autores destinan el último capítulo a un tema completamente diferente, el flujo gaseoso unidimensional. La cuestión no es ahora la viscosidad, sino la compresibilidad; se puede volver, pues, al flujo ideal y limitarlo, por simplicidad, al caso unidimensional, reduciendo el problema a un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales de primer orden. Su tratamiento matemático conduce a las nociones de característica, de invariante de Riemann y de onda simple. El primer apartado está dedicado, precisamente, a presentar (o recordar) estas ideas. Tanto este apartado como la totalidad del capítulo serán muy interesantes para un estudiante que curse simultáneamente mecánica de fluidos y ecuaciones en derivadas parciales.

El cruce de características es un típico fenómeno no lineal que conduce a la aparición de discontinuidades, o choques. Su tratamiento lleva a la introducción de las soluciones débiles y las condiciones de salto. El segundo

apartado del tercer capítulo recoge estos temas y su concreción al flujo gaseoso unidimensional. El tercer apartado estudia el problema de Riemann, es decir, el problema del flujo gaseoso unidimensional con condiciones iniciales discontinuas. La solución de este problema sirve de base al método de Glimm, que resuelve, por aproximación, situaciones generales.

El último apartado del tercer capítulo explica las ondas de combustión. Para describir la combustión de los gases, es necesario modificar ligeramente las anteriores ecuaciones de la dinámica de gases, permitiendo la liberación de su energía química. Las técnicas introducidas en los anteriores apartados permiten tratar, entonces, esta nueva situación. Cierran la obra con una tabla de identidades vectoriales y un índice alfabético. (A.P.)

HENRI JACOB VICTOR SODY (1892-1959): HIS LIFE AND WORK, por J. H. Becking. E. J. Brill; Leiden, 1989. **THE ZOOLOGICAL EXPLORATION OF SOUTHERN AFRICA 1650-1790**, por L. C. Rookmaaker. A. A. Balkema; Rotterdam, 1989. **LONGINOS NAVAS, CIENTIFICO JESUITA**, por Juan Jesús Bastero. Universidad de Zaragoza, 1989. **THE CONTENTED BOTANIST. LETTERS OF W. H. HARVEY ABOUT AUSTRALIA AND THE PACIFIC**, preparado por Sophie C. Ducker. Melbourne University Press, 1988. **JOHN LIGHTFOOT. HIS WORK AND TRAVELS**, por Jean K. Bowden. The Bentham-Moxon Trust; Kew, 1989. **NATURE AS THE LABORATORY. DARWINIAN PLANT ECOLOGY IN THE GERMAN EMPIRE, 1880-1900**, por Eugene Cittadino; Cambridge University Press, 1990.

Aconsejaba Ortega en sus lecciones *ad usum delphini* que la juventud es edad propicia para leer biografías y libros de viajes. Esa admonición y aquella otra zubiriana de aprender griego, matemáticas y alemán ha guiado la formación de lo más sólido de la cultura española reciente. A modo de gavilla de muestra en pro de esa corriente pedagógica ofrecemos un somero panorama de biografías recientes de naturalistas viajeros: zoólogos y botánicos.

Se objetará con razón que es pleonasmo hablar de naturalistas viajeros. Como se titula la última obra botánica referenciada, la naturaleza es el laboratorio, el medio donde respira y trabaja el biólogo de los tiempos heroicos. Porque ése es otro adjetivo que pertenece con rigurosa propiedad a los naturalistas que se aventuraron por Africa, Asia, América y Australia en el rendimiento de su culto a Flora, como se decía entonces, o a la caza y descripción de mil especies de mamíferos y aves, o de peligrosos insectos que vehiculaban parásitos bacterianos que, si no provocaban la muerte, enloquecían.

Holanda es, con mucho, el país que ofrece el plantel más nutrido en expediciones, jardines (no se olvide que Linneo veló sus primeras armas en el predio de Clifford), gabinetes, colecciones y publicaciones sistemáticas. Esa tradición llega hasta nuestros días, como hemos ejemplificado en el caso de Henri Jacob Victor Sody, experto en mamíferos y en aves. Sody constituye, además, el arquetipo de la vida del naturalista de todos los tiempos: de niño, aficionado a los nidos y a los campos; de joven, alumno de una escuela de agricultura; diestro en el dibujo; habilidad taxidermista; salud quebradiza; alejado de los círculos académicos del continente, que le comporta la incomprensión de sus trabajos sistemáticos, tildándosele en la metrópoli de autodidacto; negociación de sus fondos con museos extranjeros ante la falta de aprecio de su país; recuperación de su memoria después de su muerte. Esas notas que vienen a constituir el esqueleto de la hagiografía naturalista se completan aquí con los rasgos peculiares de Sody: fina percepción de las relaciones entre el contenido estomacal de las aves y las plantaciones, o de las huellas de ciertos mamíferos, que le induce a estudiar las especies vulgares y valiosas para trazar la cadena trófica del ecosistema indonesio donde trabaja; sentido globalizador de la ciencia, con sus incursiones en la oología y en primatología. El libro de Becking incorpora fragmentos significativos de su obra escrita, la lista de sus descripciones y reseñas biográficas de quienes auxiliaron a Sody en su labor recolectora.

En *The zoological exploration*... Rookmaaker ha conseguido convertir un trabajo de dura investigación básica, con listas de especies, sinonimias, mapas, acopio inmenso de datos biobibliográficos, una obra de consulta en fin, en un producto que es recreo de la vista y acicate de la imaginación. Deje el lector de lado otros montones de paja, caña pagada a precio de oro, eso es verdad, que se están aventando con motivo de la aventura colombina, y embárquese en esta navegación que le llevará a entender, ni más ni menos, la fiebre naturalista del XVII y XVIII. El nudo de la obra analiza con pormenor los resultados de siete expediciones famosas a Sudáfrica, las de Johann Reinhold Forster, Robert Jacob Gordon, Francis Masson, William Paterson, Anders Sparrman, Carl Peter Thunberg y François Levaillant. Pero no se limita a ellos, sino que recoge cuantos testimonios —escritos o pictóricos— ha podido recabar en museos de toda Europa que tengan alguna relación con alguna especie animal del Cabo o sus aledaños. Puesto que muchos eran también botánicos expertos, la documentación que aquí se ofrece adquiere un valor singular para entender la figura del apóstol linneano Thunberg, por ejemplo, quizás el único de los citados que influyó directamente en los naturalistas de nuestro país.

De registro menor es, sin embargo, la biografía del Padre Navás, libro del que sólo salvaría los apéndices (escritos y géneros y especies identificados por nuestro entomólogo) por lo que tienen de punto de partida para una historia reciente de la biología española en clave jesuítica: Merino, Navás, Barnola y Pujiula.

No es grano de anís que desde Darwin, y éste el primero, se venga considerando a William Henry Harvey maestro en criptogamia. Ni es juicio desmesurado el "eulogio" que le consagró, en 1864, el amigo americano de ambos, Asa Gray: "Fue Harvey uno de los pocos botánicos de nuestros días que brillaron en fanerogamia y en criptogamia. En algología, su parte favorita, no anduvo probablemente a la zaga de nadie." Sophie C. Ducker, experta ella en plantas inferiores, presenta una selección de las cartas que dirigió, sobre todo, a Hooker y a Gray, con el propósito de recoger, a través de las mismas, la vida de este naturalista que compendia el prototipo del botánico de la primera mitad del XIX: sistemático, morfólogo y con atisbos globalizadores (anotación de la geografía física, de la temperatura, de las pautas de vegetación, etcétera). En su mesa, junto a las gavetas de pliegos de herbario, se mantienen abiertos los clásicos contemporáneos, es decir, De Candolle, Endlicher, Walpers. No sólo esos. Escribe desde Valparaíso, procedente de Australia, habiendo estado años antes en el Cabo: "Si llega a las manos de Pamplin u otro librero de lance un ejemplar del *Ruiz y Pavón barato* me gustaría que me lo enviara."

Naturalista del siglo XVIII por antonomasia es la figura del apotecario que, en su recogida frecuente de plantas medicinales, se va familizarizando con otras especies de la flora local, o la del clérigo al frente de una parroquia, que encauza su tiempo y energías al descubrimiento, clasificación e intercambio de plantas, conchas o in-

sectos. Son arquetipos que se repiten, en toda Europa, con los farmacéuticos y, por aquello de *huius regio cuius religio*, con los vicarios anglicanos, los pastores protestantes y los sacerdotes católicos. El modelo se prolonga hasta nuestros días y, por ejemplificarlo en España, en Zapater, entre los últimos, y Pau, entre los boticarios. En Gran Bretaña han sido siempre legión los clérigos expertos en historia natural, como John Lightfoot, autor de una *Flora scotica* en dos volúmenes aparecida por vez primera en 1777. Bowden no ha contado con demasiada riqueza documental para trazarnos su biografía, por lo que se ha visto obligado a insistir en el contexto o marco general. Y en eso gana el lector foráneo, a quien quizá le importe menos la historia íntima y más el papel de Banks, por ejemplo, en el crecimiento de la botánica inglesa, la red por donde cursa la información científica, nivel de la ciencia (de la criptogamia y su evolución en los linneanos ingleses), etcétera. Con esa perspectiva debe leerse la obra.

El *aggiornamento* del naturalista llega, en el último tercio del siglo XIX, con la asimilación de la biología de laboratorio y la incardinación de la teoría darwinista de la adaptación o de la selección natural. Van por delante los alemanes, que Eugene Cittadino en *Nature as the laboratory* divide en dos equipos: el grupo formado en la Universidad de Berlín en torno a la figura de Simon Schwendener y un segundo grupo constituido por dos subgrupos, el de los discípulos de Anton de Bary y el de los seguidores de Eduard Strasburger. A España llegará, en mayor o menor medida, la influencia de casi todos, si bien la temprana traducción del "Strasburger", y su persistente imposición como libro de texto hasta nuestros días, decanta la balanza en favor del grupo de Bonn.

La botánica "científica" de Matthias J. Schleiden, que se asentó a lo largo de los años cuarenta del siglo pasado, tuvo su prolongación, durante tres décadas, en los estudios microscópicos (citología e histología) y el desarrollo *in vitro* de la fisiología vegetal. Eran años de vehemente inductivismo, que miraba con un punto de desdén los trabajos sistemáticos y las descripciones morfológicas.

Pero en las postrimerías de los años setenta se produce un movimiento pendular. Al grito de que la botánica no se aprende en los libros, o el que da título a esta obra: el mejor laboratorio, la naturaleza, se lanzan a comprobar *in situ* la verdad de la adaptación proclamada por el darwinismo. No es un lanzamiento al vacío, porque de lo que se trata de probar no son generalidades, ni truismos, sino lo aprendido en las décadas anteriores de experimentación química y observación microscópica. Tampoco fue una entrega sin condiciones. Salvo en contadas excepciones, predominaba el escepticismo ante la teoría evolucionista de Darwin. Para una mentalidad arraigadamente mecanicista, el papel que el albur o el azar desempeña en la teoría de la descendencia, o la fuerza determinante concedida al medio, resultaban harto hipotéticas. Pero esa debilidad doctrinal a los ojos de los maestros, se convertía en hechizo para los jóvenes, cansados de reduccionismos irrespirables y buscadores de las grandes síntesis filogenéticas que el darwinismo prometía. ¿Por qué no preguntárselo a la naturaleza? Así comienzan expediciones y viajes, subvencionados por el poder político y las universidades. Es una vuelta al viejo naturalista, con la diferencia de que no esperan encontrar especies desconocidas, sino lazos y trabazones. Más. Las especies comienzan a recibir una explicación que encaja en el nuevo marco. Nada más idóneo para justificar la adaptación que epífitos y lianas en los trópicos o plantas de situaciones límite (las cactáceas de los desiertos); o lo que es lo mismo, tratados sobre las distintas clases de hojas y su acomodación al medio.

Cittadino va explicando los distintos enfoques de escuela en torno a esos temas centrales. Su trabajo, bien tejido, aporta nueva luz a un tiempo absolutamente distorsionado entre nosotros por la figura de Haeckel y, en otro aspecto, por las ideas sobre los tropismos que gozan de extenso fervor. (L.A.)



3. Aves de Africa del Sur: Sigelus silens (arriba) *y* Pogonichla stellata (abajo).

Apuntes

El dióxido de carbono en cifras. A lo largo de la evolución, la concentración atmosférica de CO_2 ha cambiado. Durante los períodos glacial e interglacial se produjeron fluctuaciones de 200 a 300 $cm^3\ m^{-3}$. En el curso de los últimos cien años, la concentración de CO_2 creció desde 275 hasta el valor actual de 350 $cm^3\ m^{-3}$. Se estima que se elevará hasta 2000 $cm^3\ m^{-3}$ en el próximo par de siglos si se consume todo el combustible fósil. ¿Qué consecuencias climáticas y ecológicas traerá esa tendencia alcista? No lo sabemos a ciencia cierta. Por lógica, la aceleración de la actividad fotosintética comportará un mayor peso foliar por unidad de superficie, mayor peso del tallo por unidad de longitud y un mayor ritmo en el crecimiento absoluto.

Se acepta que las perovskitas de silicatos ricos en magnesio forman la fase mineral que predomina en el manto inferior de la Tierra. Conocer cuál sea su comportamiento a presiones y temperaturas altísimas, las que allí rigen, resulta imprescindible para entender la evolución química y térmica del planeta, la convección y gradiente térmico del manto, así como las variaciones del campo magnético terrestre. Las simulaciones realizadas por ordenador, el enfoque investigador viable por ahora, hablan de transiciones de fase, allá en el manto inferior, de las perovskitas ortorrómbicas, eléctricamente aislantes, a perovskitas cúbicas, o conductoras.

Distingue la lingüística entre lenguaje y habla. El lenguaje humano fue gestual en sus comienzos, como el rudimentario que se le enseña a gorilas y chimpancés, cuya complejidad puede asimilarse perfectamente a los modos telegráficos de un humano de dos años. Pero la complejidad descriptiva y gramatical del lenguaje adulto, que se asocia al habla, exige facultades que trascienden a las demás especies de la Tierra, sobrevenidas quizás en los últimos 40.000 o 100.000 años.

La agresividad neonatal entre aves de una misma pollada es un fenómeno conocido entre rapaces. Se acaba de descubrir ese rasgo en un mamífero, la hiena manchada (*Crocuta crocuta*), que abunda en Africa subsahariana. Las hembras recién nacidas atacan, hasta matarlas, a sus compañeras de camada, destino que no suele ser inevitable si el gemelo es macho. Se hallan perfectamente capacitadas para ese comportamiento: nacen con niveles altos de andrógenos y presentan un desarrollo precoz del sistema motor y una dentición afilada en caninos e incisivos.

Sigamos comparando. Es manifiesto el carácter distinto de la madre y autónomo del embrión de mamíferos. Comienza a estudiarse en invertebrados. Ofrecen éstos, a través del caso particular del erizo de mar, un sistema experimental extraordinario: cada hembra produce un número de ovocitos que no igualarían, en conjunto, millones de mujeres. De lo investigado hasta ahora se sabe ya que, a los cinco minutos de la fecundación, los ovocitos se han protegido con una cubierta esférica para acometer las sucesivas divisiones celulares sin sufrir ataques del medio ni la agresión de ningún espermatocito más. La cubierta está formada por dos compartimentos celulares: una capa vitelina y el contenido de un amasijo de vesículas secretoras.

Conoceríamos mejor la densidad del Universo primigenio si supiéramos la razón creada de deuterio a hidrógeno durante la gran explosión inicial. No podemos averiguarlo en las estrellas más cercanas —ni siquiera en las menos ''metalizadas''— porque poseen ya una historia de miles de millones de años y pudo haberse trastocado, en consecuencia, la relación deseada. Podría empezar a verse un rayo de claridad en los espectros de los cuásares. La luz que de esos objetos remotísimos nos llega atraviesa las nubes de Lyman, formadas por un gas bastante primitivo. Podría haber en ellos trazas de deuterio, susceptibles de detección y, por tanto, indicativos de la razón de deuterio a hidrógeno.

Hay un mundo nebuloso en biología tan importante como el recogido en los libros: el mundo de ARN. No es tajante la repartición de funciones que atribuye al ADN el código genético, a las proteínas el armazón estructural de las células y al ARN el papel de enlace entre aquél y éstas. La propia vida en sus inicios pudo ser una vida de ARN, en la que éste poseía capacidad de autorreplicación sin que mediara ningún polipéptido. Hasta ahora suponíase que todos los factores de transcripción eran proteínas, pero se acaba de descubrir en los gusanos de seda un factor de ARN que pone en marcha la maquinaria celular.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



TENDENCIAS ANTICIENTIFICAS EN LA UNION SOVIETICA, por Sergei Kapitza
Exposición de las razones por las que la Unión Soviética está atravesando una etapa de eclosión de las supersticiones y protestas contra el progreso tecnológico.

GALAXIAS EN COLISION, por Joshua Barnes, Lars Hernquist y François Schweizer
Los choques violentos entre galaxias constituyen un fenómeno habitual, que suele acabar creando galaxias elípticas y cuásares activos.

EL TELOMERO HUMANO, por Robert K. Moyzis
En el lenguaje de la genética, fin se escribe TTAGGG, secuencia de nucleótidos que se repite en la punta de los cromosomas y crea una suerte de coraza contra la degradación de los mismos.

BIOSENSORES, por Jerome S. Shultz
Se trata de introducir materia viva (vegetal o animal) en un circuito eléctrico o conectarla con fibras ópticas para producir sensores en tiempo real que adquieren especial interés en medicina.

***PHILANTHUS*, por Howard E. Evans y Kevin M. O'Neill**
Las hembras de estos insectos amantes de las flores son voraces depredadoras de abejas para alimentar a sus larvas. Los machos, no menos agresivos, pugnan entre sí por el acceso a las hembras.

EL HOMBRE NEOLITICO Y LA MUERTE, por Alain Gallay
Las variaciones de riqueza en el mobiliario fúnebre y la diversificación de aderezo y acondicionamiento de las tumbas del neolítico son testimonio de una evolución social concomitante.

GENES INTELIGENTES, por Tim Beardsley
¿Por qué genes muy parecidos producen células muy dispares? La respuesta yace en la gavilla de genes que se activen y en el momento en que lo hagan.

REPRESENTACION Y RASTREO DE PARTICULAS ELEMENTALES, por Horst Breuker, Hans Drevermann, Christoph Grab, Alphonse A. Rademarkers y Howard Stone
El mayor colisionador del mundo produce, cada segundo, 25.000 millones de bits de datos, que deben traducirse en imágenes del vuelo de las partículas.

